

**TRANSFORMACIÓN TECNOLÓGICA DE UN VEHÍCULO DE MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA (MCI) A VEHÍCULO ELÉCTRICO (VE)**

**JUAN SEBASTIÁN VALENCIA TONUSCO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2019**

**TRANSFORMACIÓN TECNOLÓGICA DE UN VEHÍCULO DE MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA (MCI) A VEHÍCULO ELÉCTRICO (VE)**

**JUAN SEBASTIÁN VALENCIA TONUSCO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Ph.D. Edgar Alonso Salazar Marín**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2019**

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	7
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.2. JUSTIFICACIÓN	9
1.3. OBJETIVOS	10
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	10
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
<b>2. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO</b>	11
2.1. DESCRIPCIÓN	11
2.2. COMPONENTES Y SISTEMAS	12
2.3. BREVE HISTORIA	17
2.4. PANORAMA ACTUAL	19
2.5. NORMATIVIDAD	22
2.5.1. AVANCES NORMATIVOS EN COLOMBIA	24
2.6. RECONVERSIONES TECNOLÓGICAS DE VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA A VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	26
<b>3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO</b>	29
3.1. PRUEBAS EN VACÍO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO	31
3.2. MODELADO 3D DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO SOBRE EL VEHÍCULO BASE	32
<b>4. SELECCIÓN DEL VEHÍCULO BASE LA RECONVERSIÓN</b>	34
4.1. PRUEBAS PRELIMINARES DEL VEHÍCULO BASE	37
<b>5. DESMONTAJE DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN</b>	38
<b>6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS</b>	42
6.1. PLACA DE ADAPTACIÓN	42
6.2. SISTEMA DE SUJECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO	44
6.3. CÁLCULO DE LA UNIÓN ESTRIADA ENTRE MANZANA DE ACOPLE Y EJE DE MOTOR ELÉCTRICO	50
6.3.1. ESFUERZO DE APLASTAMIENTO	51
6.3.2. ESFUERZO AL DESGASTE	54
6.4. ACOPLE FLEXIBLE	57
6.4.1. DETERMINACIÓN DEL PAR DE TORSIÓN NOMINAL	58
6.4.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SERVICIO	58

6.4.3.	CÁLCULO DEL “PAR DE TORSIÓN DE DISEÑO” [TD] REQUERIDO .....	59
6.4.4.	SELECCIÓN DEL ACOPLE.....	59
6.4.5.	VERIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE ACOPLE SEGÚN CRITERIO DE RPM PERMISIBLE.....	61
6.4.6.	MODIFICACIONES REALIZADAS AL ACOPLE.....	61
7.	<b>MONTAJE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO SOBRE EL VEHÍCULO BASE .....</b>	<b>63</b>
8.	<b>PRUEBAS PRELIMINARES EN EL DINAMÓMETRO DYNAPACK UTP .....</b>	<b>68</b>
8.1.	CÁLCULO PRELIMINAR DE LA AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	69
9.	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES .....</b>	<b>71</b>
9.1.	CONCLUSIONES .....	71
9.2.	RECOMENDACIONES .....	72
9.3.	APORTES .....	72
10.	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>73</b>

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Concentración de CO <sub>2</sub> en ppm y la temperatura media del planeta.....	8
Figura 2. Distribución porcentual del consumo energético en Colombia. ....	8
Figura 3. Aportes de CO <sub>2</sub> equivalente generados por los diferentes sectores. ....	9
Figura 4. Características de las baterías para vehículos eléctricos [2] .....	13
Figura 5. Desarrollo de los vehículos eléctricos desde 1897 hasta la fecha [13] .....	19
Figura 6. Vehículos eléctricos dispuestos en el mercado desde 2010 [14] .....	21
Figura 7. Estándares publicados por ISO aplicados a Vehículos Eléctricos. [16] .....	23
Figura 8. Estándares publicados por IEC aplicados a Vehículos Eléctricos. [16] .....	24
Figura 9. Normatividad y condiciones que rigen al transporte eléctrico en Colombia. [16] .....	25
Figura 10. Potencia y par de torsión en función de la velocidad.....	30
Figura 11. Esquema de conexiones eléctricas. ....	31
Figura 12. Ensamblaje de prueba inicial sin carga.....	32
Figura 13. Representación en 3D del sistema de tracción eléctrico sobre el vehículo base para reconversión. ....	33
Figura 14. Vista lateral del vehículo base para la conversión .....	36
Figura 15. Vista frontal vehículo base para conversión. ....	37
Figura 16. Ciclo de conducción: NEDC. Urbano (ECE), Extra Urbano (EUDC) [29].....	37
Figura 17. Vehículo base antes de la transformación.....	38
Figura 18. Taller de mecánica reconocido en la región utilizado para la transformación .....	39
Figura 19. Desmontaje del capó. ....	39
Figura 20. Desmontaje de mangueras y ductos de aire. ....	39
Figura 21. Extracción de tubo de escape, radiador, semiejes y tanque de gasolina. ....	40
Figura 22. Desmontaje del conjunto motor-caja. ....	41
Figura 23. Desensamble de la caja de velocidades y el motor de combustión.....	41
Figura 24. Desmonte de la tubería de alimentación de combustible.....	41
Figura 25. Placa de adaptación en 3D. ....	42
Figura 26. Recorte de la placa.....	43
Figura 27. Perforación de los agujeros.....	43
Figura 28. Montaje de placa de adaptación en conjunto con el motor eléctrico y la caja de velocidades. ....	44
Figura 29. Esquema del sistema de sujeción del motor eléctrico.....	45
Figura 30. Apoyo 1 de la carrocería.....	45
Figura 31. Apoyo 2 de la carrocería.....	46
Figura 32. Proceso de fabricación de sistema de sujeción del motor eléctrico. ....	46
Figura 33. Modelado 3D sistema de sujeción del motor.....	47
Figura 34. Ubicación de cargas en el software de simulación del sistema de sujeción. ....	48
Figura 35. Mallado en el software de simulación de sistema de sujeción.....	48
Figura 36. Esfuerzo Von Mises de sistema de sujeción.....	49
Figura 37. Deformaciones del sistema de sujeción. ....	49
Figura 38. Esquemas de cálculo de las uniones estriadas utilizadas en las transmisiones de potencia mediante ruedas dentadas. [30].....	50

Figura 39. Curva característica (valores nominales) suministrada por el fabricante del motor eléctrico. [32].....	53
Figura 40. Acople flexible INTERFLEX. [33] .....	57
Figura 41. Esquema y dimensiones del acople flexible. [33].....	60
Figura 42. Realización de estrías en el acople.....	61
Figura 43. Esquema de disposición de espacio entre el conjunto motor-caja (medidas en mm)...62	
Figura 44. Dimensiones finales acople flexible (en mm).....	62
Figura 45. Modelado 3D del acople flexible.....	62
Figura 46. Circuito de conexiones del sistema de tracción eléctrico. ....	63
Figura 47. Montaje de la batería sobre el vehículo base para la reconversión.....	64
Figura 48. Ensamble del conjunto motor-caja.....	64
Figura 49. Instalación del conjunto motor-caja sobre el vehículo base para la reconversión. ....	65
Figura 50. Instalación del controlador sobre el vehículo base para la reconversión.....	65
Figura 51. Instalación del convertidor DC-DC sobre el vehículo base para reconversión. ....	66
Figura 52. Instalación del cargador de la batería en el vehículo base para reconversión. ....	66
Figura 53. Instalación del acelerador electrónico en el vehículo base para la reconversión.....	67
Figura 54. Instalación del conector de carga en vehículo base para la reconversión.....	67
Figura 55. Laboratorio de pruebas dinámicas automotrices. ....	68
Figura 56. Dinamómetro de cubos con el módulo DYNAPACK. ....	68
Figura 57. Vehículo eléctrico acoplado al dinamómetro de cubos. ....	69

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Vehículos eléctricos convertidos localmente. ....	28
Tabla 2. Vehículos candidatos para la conversión .....	36
Tabla 3. Propiedades del material de fabricación de la pieza de sujeción. ....	47
Tabla 4. Esfuerzos admisibles de contacto para las uniones estriadas. [31] .....	52
Tabla 5. Guía de selección del coeficiente de régimen de carga. [31].....	55
Tabla 6. Esfuerzo permisible convencional de desgaste en MPa. [31] .....	56
Tabla 7. Factores de servicio según la aplicación del motor.....	59
Tabla 8. Denominación de los acoples, datos de entrada Tn y Td.....	60

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la energía es un tema que genera preocupación y debate en el contexto socioeconómico. La necesidad de reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles ha propiciado un incremento importante de la fracción de energía renovable. Por otro lado, y de cara a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del transporte, se prevé la implementación del vehículo eléctrico de manera generalizada.

Un vehículo eléctrico es aquel que utiliza un motor eléctrico en lugar de un motor convencional de combustión interna, y un conjunto de baterías en lugar de un tanque de gasolina. Es posible construir un vehículo que tenga las mismas ventajas de uno con motor de combustión interna, pero sin los inconvenientes tales como polución, ruido, reducción de los recursos naturales y degradación del medio ambiente en general, para ello, la opción más viable es la construcción del vehículo eléctrico, el cual es de cero emisiones y también de cero poluciones, al no utilizar gasolina ni aceites, lo que también resulta extremadamente limpio y con un funcionamiento silencioso.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las consecuencias del cambio climático son cada vez más evidentes, resultado de la emisión de gases efecto invernadero. Diversas publicaciones han tratado el tema<sup>1</sup>. El derretimiento de polos, el clima impredecible y otras consecuencias son apenas una muestra de lo que a futuro será un problema mayor. En Colombia las inundaciones en épocas de invierno y los perjuicios por sequías en épocas de verano son evidencias que se pueden presenciar cada temporada. Los gases efecto invernadero son generados principalmente por los productos de combustión de combustibles fósiles. El gráfico de la figura 1 presenta la relación que ha tenido la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera con la temperatura media del planeta.

---

<sup>1</sup> <http://cambioclimaticoglobal.com/estudios-y-evidencias-del-calentamiento-global>

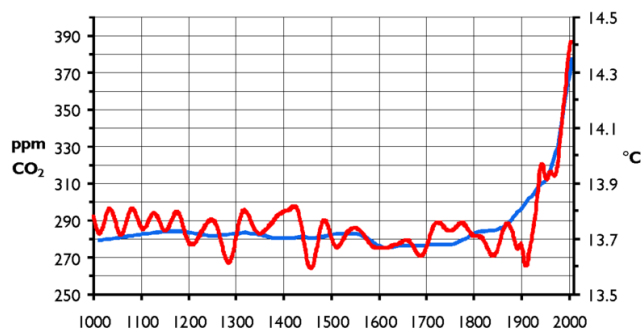


Figura 1. Concentración de CO<sub>2</sub> en ppm y la temperatura media del planeta<sup>2</sup>

Esta tendencia es un indicador de los efectos de los gases de combustión sobre el calentamiento global. El transporte, a diferencia de otros sectores (industrial, residencial) sigue siendo una de las mayores fuentes de generación de gases efecto invernadero. Las diversas tecnologías que se han venido desarrollando en los últimos años han pretendido diversificar los tipos de fuentes energéticas en los vehículos; hidrógeno, celdas de combustible, motores eléctricos, generación híbrida, gas natural, etc.

En relación a Colombia, diversos estudios realizados por la Unidad de Planeación minero energética UPME han mostrado que en términos de consumo energético el sector transporte aumenta progresivamente en relación a los demás. La figura 2 muestra que el transporte representa el 34,9 % del consumo total energético del país (superior a todos los demás sectores).

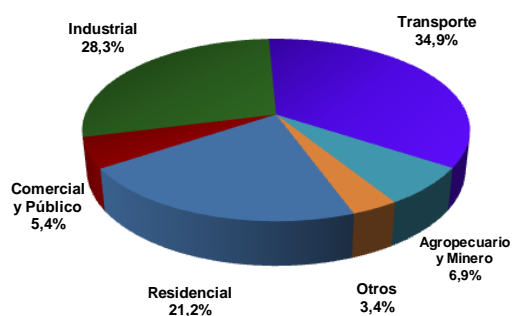


Figura 2. Distribución porcentual del consumo energético en Colombia<sup>3</sup>.

Este consumo repercute en contaminación directa con gases efecto invernadero.

<sup>2</sup> <http://www.ipcc.ch/present/graphics>.

<sup>3</sup> <http://www1.upme.gov.co/principales-indicadores>



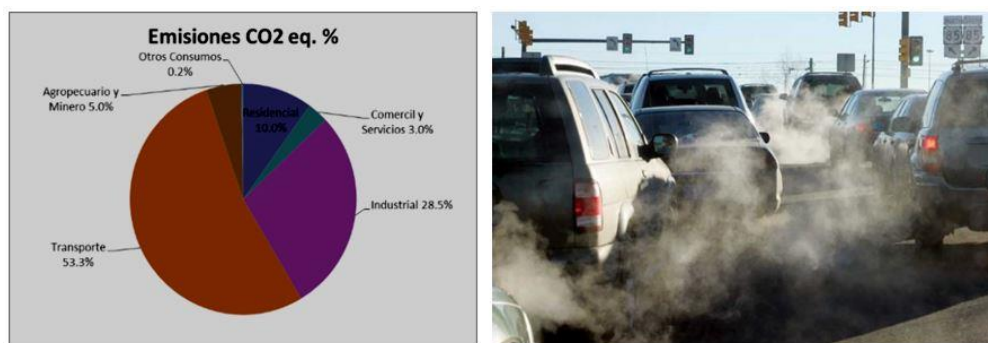


Figura 3. Aportes de CO2 equivalente generados por los diferentes sectores<sup>4</sup>.

La figura 3 muestra que el transporte representa el 53,3 % de CO<sub>2</sub>, muy por encima de otros sectores contaminantes como el industrial (con un 28,5 %).

## 1.2.JUSTIFICACIÓN

Colombia viene experimentando una etapa de transición a las fuentes renovables de energía, en donde el transporte sostenible se convierte en una de las líneas potenciales de desarrollo. Los vehículos eléctricos son una alternativa interesante en términos de sostenibilidad en transporte, no obstante, el gran reto se presenta en las altas demandas de carga (par y potencia) debidas a las altas pendientes de la topografía colombiana. Diversos vehículos se encuentran en prueba en Medellín, Bogotá, Cali y Manizales, pero aún los costos de comercialización superan ostensiblemente los vehículos normales (MCI).

Por otro lado, el costo del combustible es muy superior si se compara la relación costo/poder adquisitivo de otros países. Este costo es injustificable cuando un país como Colombia es uno de los mayores productores de petróleo de Latinoamérica. Otros problemas que acarrea el combustible en el país es todo lo concerniente al contrabando, además de los grandes problemas de conflictos armados a nivel mundial con países dueños de las mayores fuentes de petróleo. Algunos estudios han mostrado de qué forma la demanda superará progresivamente la oferta de petróleo en el mundo. Las reservas de petróleo no serán capaces de abastecer la demanda de vehículos si continúa el ritmo actual de producción de vehículos tradicionales (MCI).

<sup>4</sup> <http://www1.upme.gov.co/principales-indicadores>

La pregunta concreta de investigación que se quiere resolver es ¿De qué manera la transferencia tecnológica desarrollada en vehículos tradicionales para su reconversión a vehículos eléctricos generará impacto de tipo económico y ambiental? Para ello, se pretende materializar el procedimiento con un vehículo prueba de baja gama originalmente con MCI y efectuar la transformación óptima a un vehículo con fuente eléctrica. De otro lado, la Universidad tecnológica de Pereira debe prestar mayor atención a los proyectos que involucran un verdadero enfoque tecnológico que aporten con conocimiento de causa al contexto regional y nacional. En este caso la experiencia adquirida científica y técnica será un referente importantísimo para talleres y concesionarios del sector de autopartes.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, adecuar e implementar la transformación tecnológica de un vehículo de combustión interna a un vehículo eléctrico.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Efectuar una revisión bibliográfica como referente conceptual en reconversiones tecnológicas de motores de combustión a motores eléctricos.
- Seleccionar el vehículo ideal en términos de peso/potencia como base de implementación del sistema eléctrico.
- Determinar los componentes de recambio de un vehículo (MCI) tradicional y las condiciones requeridas para una óptima implementación del sistema eléctrico.
- Diseñar y fabricar las adecuaciones requeridas (acople) en el ensamble motor-caja de velocidades a implementar en el vehículo.
- Adecuar al vehículo base, el sistema de tracción eléctrica diseñado y seleccionado con todos sus componentes, previo desmontaje del motor de combustión interna y toda su base estructural.

## **2. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO**

Antes de referir la experiencia en la transformación tecnológica de un vehículo de motor de combustión interna a vehículo eléctrico, se considera conveniente hacer una descripción general de qué se entiende por vehículos eléctricos, las tipologías que se pueden identificar para estos vehículos, así como las características de algunos de los elementos más relevantes que componen los vehículos eléctricos, como pueden ser las baterías, los sistemas de recarga, BMS y los motores eléctricos.

### **2.1.DESCRIPCIÓN**

Los vehículos eléctricos se caracterizan porque su movimiento se basa en un sistema de tracción eléctrica, total o parcialmente. El motor eléctrico que acciona las ruedas del vehículo puede ser alimentado por un sistema de baterías o un sistema de pilas (celdas) de combustible que consumen hidrógeno. Además, existe la posibilidad de utilizar un sistema híbrido, en el cual un motor eléctrico y un motor de combustión interna (MCI) operan conjuntamente. A continuación, se describen las diferentes tipologías que se pueden identificar para este tipo de vehículos.

- Dependiendo del origen de la energía:
  - Los basados en pilas/celdas de combustible, los cuales consumen hidrógeno.
  - Los basados en baterías recargables: consumen electricidad bien sea generada internamente por el vehículo, suministrada por la red de distribución eléctrica, o ambas en caso de que el vehículo esté equipado con un sistema de frenado regenerativo.
  
- Dependiendo de su sistema de propulsión:

- Puros: los vehículos cuya propulsión se basa al 100% en el motor eléctrico se denominan vehículos eléctricos puros o, más en general, Vehículos Eléctricos de Baterías.
- Híbridos: son un tipo de vehículo cuyo sistema de propulsión combina dos o más fuentes de energía. En este caso, utilizando a la vez un motor de combustión interna y un motor eléctrico. El motor eléctrico utiliza la energía almacenada en las baterías que a su vez se cargan por medio del motor de combustión tradicional y el frenado regenerativo. Estos vehículos proporcionan autonomías reducidas o incluso nulas en modo eléctrico. La función principal de las baterías, es la de apoyar al motor de combustión en los momentos de mayor demanda de potencia (aceleraciones) y/o en los de menor rendimiento del mismo, como es el caso de la conducción a baja velocidad con numerosos arranques y paradas, el ralentí, etc. Su principal ventaja es la reducción del gasto de combustible. A diferencia del vehículo eléctrico puro, su batería no tiene como misión la de almacenar una gran cantidad de energía, sino que está en todo momento interviniendo en ciclos de carga y descarga. Algunas fuentes denominan híbridos ligeros a aquellos vehículos en los que el usuario no tiene la capacidad de activar el funcionamiento eléctrico de forma voluntaria. [1]

## **2.2.COMPONENTES Y SISTEMAS**

De las tipologías anteriormente descritas, es claro que la batería es uno de los componentes principales de la tecnología de vehículos eléctricos, de tal manera que define las características de los mismos y la posibilidad de hacer uso exclusivo del modo eléctrico, el cual es la razón de ser esta investigación. Los componentes y sistemas también incluyen el sistema de manejo –EMS, el cargador o inversor y el software BMS.

- **Baterías para vehículos eléctricos**

Una de las características más destacadas de las baterías es la densidad de energía, la cual hace referencia a la cantidad de la energía almacenada en una batería en función del peso de la misma. La energía específica es la densidad de energía en función del tiempo por unidad de masa. Esta característica es importante porque define la cantidad de baterías necesarias para atender requerimientos de autonomía y potencia.

Entre las tecnologías comerciales e implementadas en la actualidad en vehículos con tracción eléctrica están las baterías de: ión-litio, litio-M-polímero, níquel metal hidruro (Ni-MH), níquel-cadmio (Ni-Cd), plomo ácido (Lead acid) y sodio cloruro de nitrato (Na-NiCL<sub>2</sub>).

En la Figura 4, se presentan las características de las baterías en función de la densidad de energía y capacidad de potencia. Claramente las baterías de litio son las unidades con mayores ventajas con relación a estas características. Las baterías zebra (Na-NiCL<sub>2</sub>) y Ni-MH tienen un buen indicador de densidad de energía. Sin embargo, algunas referencias de baterías de Ni-Cd y Ni-MH poseen altos valores de densidad de potencia. De acuerdo con pruebas adelantadas en Estados Unidos, un sistema de baterías con capacidad de 40 kWh podría proveer a un vehículo eléctrico de baterías una autonomía de 125 millas bajo un supuesto de 250 Wh por milla [2].

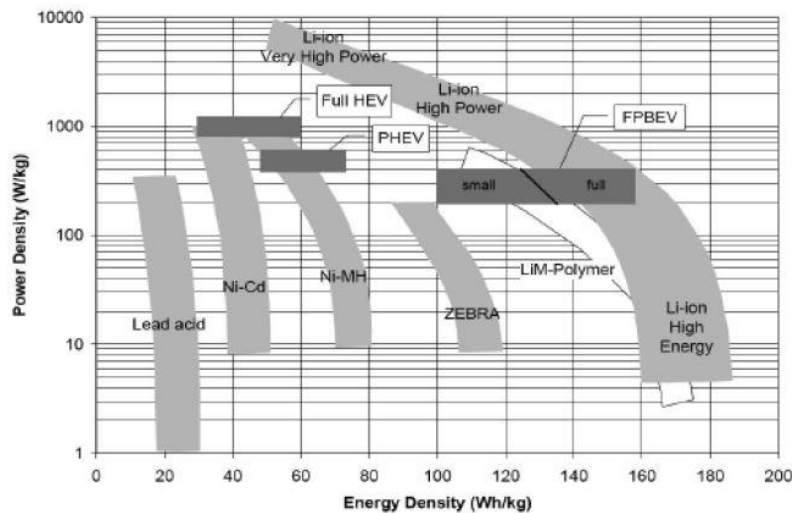


Figura 4. Características de las baterías para vehículos eléctricos [2]

Las baterías de Ni-MH y Litio ofrecen la posibilidad de desarrollar altas tasas de suministro de energía. De igual forma, este tipo de baterías pueden ser recargadas con mayor facilidad y en tasas: lenta (12 horas), rápida (4-8 horas) y súper-rápida ( $\leq 1$  hora). Este tipo de baterías son capaces de operar en rangos de temperatura más amplios (máx. 50°C) y son ambientalmente más amigables debido a la ausencia de componentes de plomo y cadmio.

Por otra parte, la configuración de las baterías en sistemas con tracción eléctrica depende de los requerimientos y de la redundancia del sistema. Los paquetes de baterías de igual voltaje pueden ser instalados en serie o en paralelo según la configuración del sistema y uso de la energía almacenada por ellas. Cada tecnología ofrece distintas densidades energéticas y de potencia; bajo este hecho, el uso de un tipo de baterías y una configuración eléctrica permite obtener diferentes autonomías, potencia y aceleración.

La selección de una batería debe estar asociada a consideraciones normativas (permiso de usar estas tecnologías), operacionales, al tipo de servicio y al usuario del vehículo eléctrico, de sus características de ciclo de vida y sus costos asociados.

- **Cargador o inversor (en algunos casos)**

Conecta la batería a la red. Transforma la electricidad alterna de la red a electricidad continua para alimentar la batería (y viceversa en sistemas V2G, inversor) y de su potencia puede depender la velocidad de recarga.

- **BMS (Battery Management System)**

Se trata de un software integrado con el inversor que gestiona la carga de las baterías permitiendo alargar su vida y evitar fallos en ese equipo tan costoso y fundamental de los vehículos eléctricos [3], [4].

- **Motor eléctrico**

A continuación, se presenta una breve referencia a los motores eléctricos más utilizados en vehículos eléctricos.

- **Motor de corriente continua:** Si bien ofrece un control de velocidad simple y se adapta perfectamente a las características de par motor, su rendimiento es muy bajo y la presencia del conmutador limita la capacidad de sobrecarga y la velocidad máxima exigiendo mayor atención en el mantenimiento.

- **Motor de inducción:** De acuerdo al análisis del mercado, la mayoría de las aplicaciones motrices industriales usan motores de inducción [5]. La importancia de los motores eléctricos de inducción

se debe a su construcción simple y robusta, sobre todo en el caso del rotor en forma de jaula de ardilla que les permite trabajar en circunstancias más adversas, dando un excelente servicio con reducido mantenimiento. Sin embargo, históricamente su inconveniente más grave ha sido la limitación para regular su velocidad, y de ahí que cuando esto era necesario, en diversas aplicaciones como la tracción eléctrica, eran sustituidos por motores de corriente continua. Gracias al gran avance de la electrónica industrial, con accionamientos electrónicos como inversores u onduladores y ciclo convertidor, que permiten obtener una frecuencia variable a partir de la frecuencia constante de red, y con la introducción del microprocesador en la electrónica de potencia, se han realizado grandes cambios, y los motores de inducción se están imponiendo poco a poco en los accionamientos eléctricos de velocidad variable. Funciona de tal manera que el estator induce al rotor a través de una red mono o trifásica, y las corrientes que circulan por éste último aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator.

- **Motor síncrono de imanes permanentes:** A partir del desarrollo de imanes de alta energía como los obtenidos mediante aleaciones de neodimio, hierro y boro (NdFeB) es posible construir motores síncronos en los que la excitación se obtiene del magnetismo remanente de imanes colocados en la superficie del rotor. De este modo se evitan los anillos rozantes y las pérdidas en el rotor. Gracias a lo anteriormente mencionado, estos motores presentan mejor rendimiento que los de inducción. Estos motores se emplean en aquellos accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes, teniendo además la ventaja frente a los motores de inducción de poder regular simultáneamente el factor de potencia con el cual trabaja y de este modo alcanzar un buen factor de utilización del inversor. El inconveniente de estos motores radica en la dificultad para producir debilitamiento de campo y extender la velocidad por encima de la nominal. En efecto, para debilitar el campo hay que desmagnetizar los imanes aplicando una componente de campo estator en sentido contrario. Sin embargo, esto sólo puede hacerse para niveles de desmagnetización muy limitados debido a que una desmagnetización elevada puede volverse irreversible e inutilizar los imanes. [6]

- **Modos de carga y tipos de conectores**

La norma IEC 61851-1 [7] define 4 modos posibles de carga que son los que se están considerando actualmente cuando se habla de recarga de los vehículos eléctricos:

- **Modo 1:** conexión del vehículo a la red de baja tensión a través de una toma de corriente estándar (definidos por la EN 60309-2 en el caso de Europa). La corriente no deberá exceder los 16A ni los 250V en sistemas monofásicos o 480V en sistemas trifásicos en el lado de la alimentación. En los Estados Unidos este modo está prohibido, mientras que en Europa se acepta para los vehículos eléctricos de menor tamaño (bicicletas y motocicletas). Las principales razones para considerar peligroso este modo de carga son, por un lado, la dificultad de asegurar que exista protección diferencial en todos los casos en la parte de la infraestructura y, por otro, la capacidad de las bases de enchufe convencionales para aportar la potencia especificada durante largos periodos de tiempo.

- **Modo 2:** conexión de los vehículos eléctricos a la red de baja tensión no superando los 32A ni los 250V (monofásica) o 480V (trifásica) y utilizando conectores estándar. Es obligatorio que el cable de conexión incorpore una función piloto y una protección diferencial. En algunos países, como los EEUU, pueden existir requisitos adicionales para permitir la carga en este modo (por ejemplo, la medición de las pérdidas a tierra en un rango de frecuencias).

- **Modo 3:** la toma de conexión es específica para la carga de los vehículos eléctricos. Las funciones de protección y control están en el lado del equipo que suministra la electricidad y de forma permanente.

- **Modo 4:** Los vehículos eléctricos se conectan a la red de baja tensión a través de un cargador externo que realiza la conversión CA/CC en la instalación fija. Las funciones de control y protección, así como el cable de recarga, son parte del cargador. Este modo está pensado para carga rápida en DC. [8]

La norma IEC 61851-1 no cubre todos los aspectos de seguridad relacionados con el mantenimiento y no se aplica a trolebuses, vehículos ferroviarios, camiones industriales ni a vehículos diseñados para utilización fuera de carreteras.



## **2.3.BREVE HISTORIA**

A mediados del siglo XIX, innovadores de Hungría, Holanda y Estados Unidos comenzaron a idear los primeros conceptos de vehículos alimentados por la electricidad. El vehículo eléctrico fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron, existieron vehículos eléctricos anteriores al motor de combustión sobre el que Diesel, con el motor diésel, y Otto, con el motor a gasolina crearon las bases sobre las que se sustenta hoy el automóvil [9].

Los primeros vehículos eléctricos prácticos aparecieron gracias a la invención de las baterías recargables, las cuales proporcionan un medio viable para el almacenamiento de la electricidad a bordo de un vehículo. Éstas últimas no llegaron hasta 1859 con la invención de la batería de plomo-ácido por el físico francés Gaston Planté [10]. Posteriormente fueron aumentando las mejoras a la capacidad de las baterías y permitió directamente su fabricación a escala industrial.

El interés en los vehículos eléctricos aumentó considerablemente en la década de 1890 y a principios de 1900. Encontraron popularidad entre los clientes que los utilizaban como coches de ciudad, donde su rango limitado no resultaba ser una desventaja. Los vehículos eléctricos a menudo se vendían como vehículos apropiados para las mujeres debido a su facilidad de operación y de fácil manejo, especialmente al no requerir el arranque manual con manivela que si necesitaban los automóviles de gasolina de la época; de hecho, los primeros vehículos eléctricos estaban algo estigmatizados por la percepción de que eran coches para mujeres, lo que llevó a algunas empresas a instalar radiadores en la parte delantera para disfrazar el sistema de propulsión del vehículo [11].

A comienzos de siglo XX, el 40% de los automóviles eran impulsados a vapor, el 38% eran eléctricos, y el 22% de gasolina. La mayor parte de los primeros vehículos eléctricos eran grandes y adornados, diseñados para los clientes de clase alta que los popularizó. Contaban con interiores de lujo y estaban llenos de materiales costosos. Las ventas de vehículos eléctricos alcanzaron su punto máximo a comienzos de la década de 1910.

Sin embargo, a pesar de este comienzo tan comprometedor en la industria automotriz, la producción de vehículos eléctricos se discontinuó completamente debido a las ventajas que comenzaron a tener los vehículos de combustión interna, como por ejemplo; la invención del

motor de arranque, Henry Ford desarrolló la producción en masa mecanizada, la gasolina alcanzó un precio muy popular, se empezaron a abrir carreteras al tráfico y entonces la autonomía pasó a ser una característica muy valorada, además del precio. Así mismo la velocidad máxima de los primeros vehículos eléctricos se limitaba a unos 32 km/h por causa de limitaciones en la tecnología eléctrica basada en transistores y por supuesto la baja autonomía de las baterías recargables de la época ya que no lograban andar por más de 65 km.

Afortunadamente los sistemas de tracción eléctrica continuaron evolucionando en aplicaciones industriales, y gracias al desarrollo de la electrónica de potencia se ha podido controlar la velocidad y torque de los motores sin efectos relevantes en la eficiencia de los mismos.

Gracias al enorme desarrollo de las telecomunicaciones en la última década del siglo XX y la inclusión de dispositivos móviles como celulares y computadores portátiles, se comenzó a invertir en la investigación y desarrollo de las baterías recargables. Debido a esto, en los últimos veinte años se ha aumentado en más de 5 veces la densidad energética de las baterías y los precios de éstas se encuentran en constante baja [12].

Finalmente, al comenzar el siglo XXI se proyecta una mejor perspectiva para un resurgimiento de los vehículos eléctricos. El motor de combustión interna como sistema de propulsión básico está perdiendo popularidad. Ya no parecen albergarse dudas acerca de la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el calentamiento global, ni mucho menos de las nefastas consecuencias de este proceso. A esto se suma la necesidad de no depender de un recurso finito como el petróleo. Los pronósticos no son favorables a corto plazo y en el mejor de los casos es incluso peor de lo esperado.

La figura 5 presenta la trayectoria en desarrollo de los vehículos eléctricos.

**1897**  
Primer taxi eléctrico en Nueva York. Más de 100 coches. Se difundió su uso en otras ciudades de USA como Philadelphia, Washington, Chicago y Boston.



**1906**  
La marca suiza Tribelhorn lanza buses de turismo con autonomía de 60 a 100 km y una velocidad de 25 km/h.



**1996**  
General Motors lanza el vehículo eléctrico EV-1, con una rápida aceptación de los usuarios. Los vehículos solo se arriendan, no están a la venta. En el 2002 la empresa retira todos los coches y los envía a compactar.



**2011**  
Actualmente están a la venta más de una docena de modelos eléctricos e híbridos y muchos más se comienzan a producir en los próximos meses.



Figura 5. Desarrollo de los vehículos eléctricos desde 1897 hasta la fecha [13]

## 2.4.PANORAMA ACTUAL

En la actualidad, los vehículos eléctricos vienen en un crecimiento acelerado. Un modelo 100% eléctrico con la capacidad de circular a 90 km/h con confort y seguridad puede costar de USD 28.000 a USD 89.000 con autonomías de hasta 180 km. Un modelo tipo carro de golf de hasta 45 km/h puede costar alrededor de USD 10.000. Un modelo híbrido costará de USD 35.000 a USD 85.000. Estos precios varían según el país y sus impuestos.

Recientemente hay varios modelos de Vehículo Eléctrico que se fabrican en forma artesanal y algunos más en líneas de montaje con producción de algunos cientos al mes. Es el caso de los Híbridos, Toyota Prius, Chevrolet Volt y los 100% eléctricos Nissan Leaf1 y Mitsubishi i MIEV. Hay otros, pero en este primer detalle se centrará en los que son o serán vendidos a mediano plazo en Latinoamérica donde muchas marcas no ven actualmente un mercado interesante. Sus precios van de 28.000 a 89.000 dólares según el país y sus impuestos de entrada. Hay que tomar en cuenta que cuando se refiere a vehículo eléctrico (VE o BEV, vehículo eléctrico a batería)

también se incluye a los vehículos híbridos recargables (PHEV, con motor de combustión y otro eléctrico) los eléctricos de autonomía extendida (REEV, eléctricos recargables con un generador de combustión a bordo) y los híbridos no recargables (HEV, con un motor de combustión y otro eléctrico).

En el mercado latinoamericano, han venido entrando vehículos de costos moderados, es el caso del Twizy, el kangoo (Renault) y el leaf (Nissan). Aun así, los procesos de importación e intermediación hacen que sus costos al cliente final aún no sean llamativos. Por esta razón, es necesaria la búsqueda de alternativas que permitan a cualquier usuario gozar de las ventajas de un vehículo eléctrico sin requerir la compra total del vehículo. La transferencia del sistema motriz (de combustión) a un sistema 100 % eléctrico es una opción llamativa en función de los análisis de factibilidad técnica y económica que se desprendan de este proyecto.

Como parte del estudio del estado tecnológico de vehículos eléctricos, se realizaron visitas a diversas entidades que poseen este tipo de vehículos como son La empresa de Energía de Pereira y el Sena Industria de Dosquebradas, quienes cuentan con camionetas eléctricas KANGOO Z.E. Se revisaron estos motores, sus componentes y la forma de estar ensamblados, además de la protección que poseen las baterías de litio en el vehículo (verificando que es el componente de mayor cuidado). De igual forma se analizaron los sistemas de tracción que conforman los Twizy. A través del gerente de Renault-Pereira se logró la consecución de catálogos completos de estos vehículos. La figura 6 presenta un panorama de los vehículos eléctricos que han salido al mercado.

# Übersicht Elektro-PW 2010 - 2013

Stand Feb. 2011

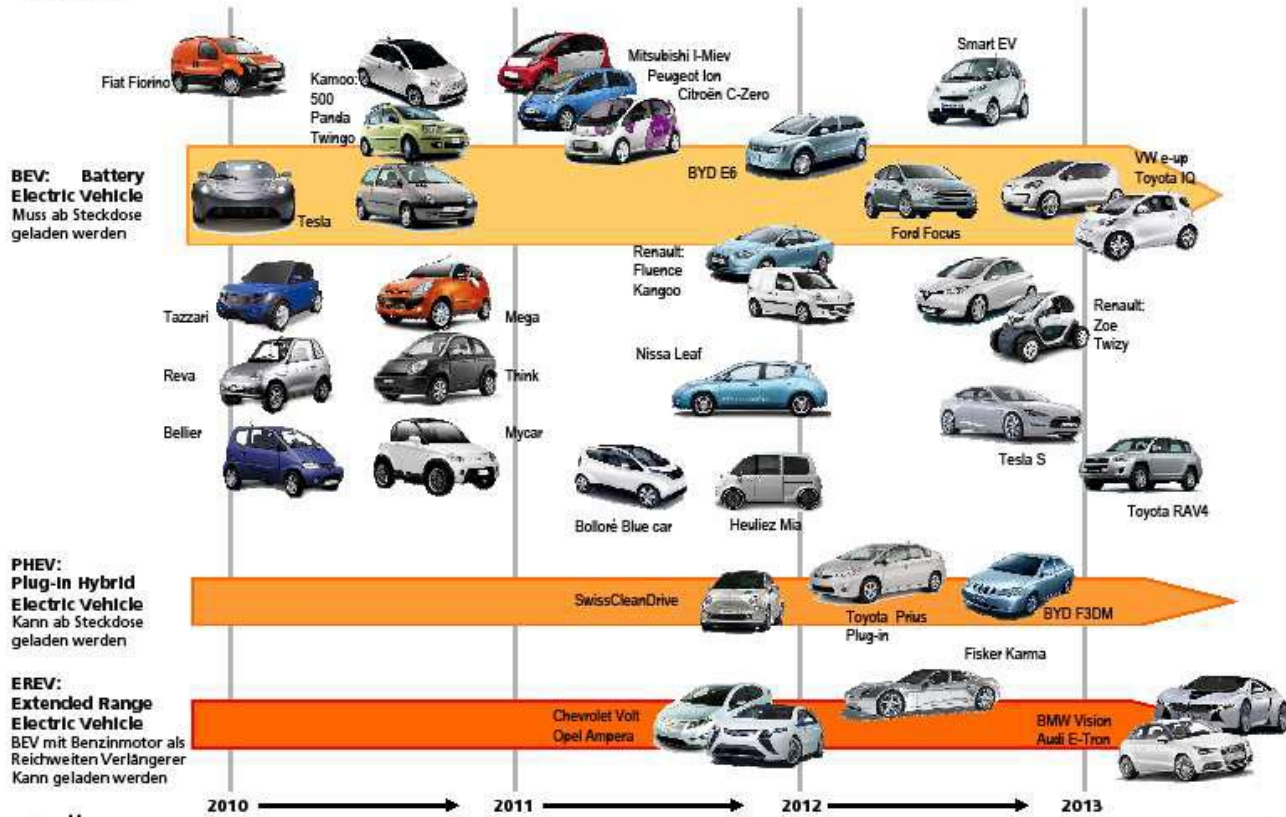


Figura 6. Vehículos eléctricos dispuestos en el mercado desde 2010 [14]

En cuanto a desempeño un vehículo eléctrico de 1000 Kg de peso consumirá en promedio 15 kWh para recorrer 100 Km. Si es un utilitario el transportar carga aumentará el consumo, de promedio cada 500 Kg serán necesarios 90 Wh por Km. La velocidad de conducción es uno de los factores más importantes para la relación de consumo. En promedio un vehículo eléctrico consume unos USD 2,5 (7500 COP) cada 100 km. Si la comparación es con uno similar a combustión, resulta de 4 a 6 veces menos al mes. En tráfico urbano con muchas paradas y arranques el consumo puede llegar a ser 10 veces menor.

## 2.5.NORMATIVIDAD

Los marcos normativos para vehículos eléctricos tienen como objetivo garantizar una adecuada operación dentro de la prestación del servicio al usuario final, considerando aspectos como seguridad, conectividad, pruebas de funcionamiento, y elementos asociados a la cadena de valor. De igual manera, propender por brindar condiciones estables de mercado, que garanticen confiabilidad y seguridad a las entidades fabricantes, proveedores y usuario final en la prestación del servicio.

A nivel mundial existen dos sistemas normativos, principalmente el IEC (International Electrotechnical International) y el ISO (International Organization for Standardization). El sistema normativo IEC comprende trabajos y actividades relacionados con componentes y suministro de infraestructura eléctrica. Por su parte ISO, se enfoca en trabajos y actividades relacionadas con el vehículo eléctrico,teniéndolo como el centro o su base. Se regula también mediante la norma ISO TC22/SC21: vehículos de carretera propulsados eléctricamente, que tiene tres grupos de trabajo (WG work group):

- WG 1 - condiciones de funcionamiento del vehículo, seguridad de los vehículos y la instalación de almacenamiento de energía.
- WG 2 - Definiciones y métodos de medición de rendimiento del vehículo y del consumo de energía.
- WG 3 - Ion de litio de tracción Baterías.

Con respecto a la norma ISO para vehículos eléctricos, una normatividad aplicable es la norma ISO 6469-3, la cual determina en ella los requisitos mínimos que deben tener en cuenta los fabricantes de vehículos de propulsión eléctrica, que otorguen seguridad al consumidor y de los agentes externos alrededor del mismo [15].

Esta norma cuenta con tres partes:

- Primera parte: Define la necesidad de seguridad en los sistemas de almacenamiento de energía recargable de los vehículos de tracción eléctrica.

- Segunda parte: Determina los medios de seguridad operacional y protección contra los errores asociados con riesgos específicos de vehículos de propulsión eléctrica.
- Tercera parte: Tiene como objetivo la protección frente a los peligros relacionados con la electricidad y que pueden afectar a los usuarios.

Se está estudiando la realización de una cuarta parte la cual se definiría de la siguiente forma:

- Futura parte cuarta: Se está trabajando para la publicación de una cuarta parte en donde se definirá los requisitos de seguridad de los vehículos eléctricos tras una colisión. En conclusión, la norma ISO TC22/SC37 (antigua SC21) y la IEC TC69 son los comités más relevantes para la normalización de vehículos eléctricos.

Algunos de los estándares ISO más relevantes son presentados en la figura 7. Por otra parte, la figura 8 presenta los estándares IEC relevantes a la movilidad eléctrica.

ESTÁNDAR Y/O PROYECTO
ISO 6469-1: 2009 - Vehículos de carretera de propulsión eléctrica. Parte 1: Sistema de almacenamiento de energía recargable a bordo.
ISO 6469-2: 2009 - Vehículos de carretera de propulsión eléctrica. Parte 2: Medidas de seguridad de operación del vehículo y protección contra fallas.
ISO 6469-3: 2011 - Vehículos de carretera de propulsión eléctrica - Parte 3: Protección de las personas contra descargas eléctricas.
ISO 8714: 2002 - Vehículos de carretera eléctricos - Consumo y modelo de energía de referencia - Procedimientos de ensayo para automóviles de turismo y vehículos comerciales ligeros.
ISO 8715: 2001 - Vehículos de carretera eléctricos - Características de funcionamiento de las carreteras.
ISO / TR 11954: 2008 - Vehículos de vehículos de celda de combustible - Medida de velocidad máxima.
ISO / TR 11955: 2008 - Vehículos de carretera híbridos - eléctricos - Directrices para la medición del balance de carga.
ISO / PAS 16898: 2012 - Vehículos de carretera de propulsión eléctrica - Dimensiones y designación de las células secundarias de iones de litio.
ISO 23274-2: 2012 - Vehículos eléctricos híbridos - eléctricos - Emisiones de gases de escape y mediciones del consumo de combustible - Parte 2: Vehículos con carga externa.
ISO 15118-2: 2014 Edición 1.0 (2014-03-31) - Vehículos de carretera - Interfaz de comunicación entre el vehículo y la red - Parte 2: Requisitos de protocolo de comunicación.

Figura 7. Estándares publicados por ISO aplicados a Vehículos Eléctricos. [16]

ESTÁNDAR Y/O PROYECTO
IEC TR 60783: 1984 Edición 1.0 (1984-12-30) - Cableado y conectores para vehículos eléctricos de carretera.
IEC TR 60784: 1984 Edición 1.0 (1984-12-30) - Instrumentación para vehículos eléctricos de carretera.
IEC TR 60785: 1984 Edición 1.0 (1984-12-30) - Máquinas rotativas para vehículos eléctricos de carretera.
IEC 61851-21: 2001 Edición 1.0 (2001-05-04) - Sistema de carga conductiva para vehículos eléctricos - Parte 21: Requisitos de los vehículos eléctricos para la conexión a una red de AC/DC.
IEC 61851-22: 2001 Edición 1.0 (2001-05-04) - Sistema eléctrico de carga del vehículo eléctrico - Parte 22: Estación de carga del vehículo eléctrico AC.
IEC 61851-23: 2014 Edición 1.0 (2014-03-11) - Sistema eléctrico de carga del vehículo eléctrico - Parte 23: Estación de carga del vehículo eléctrico DC.
IEC 61851-24: 2014 Edición 1.0 (2014-03-07) - Sistema de carga de un vehículo eléctrico - Parte 24: Comunicación digital entre un circuito cerrado, la estación de carga y un vehículo eléctrico.

Figura 8. Estándares publicados por IEC aplicados a Vehículos Eléctricos. [16]

### 2.5.1. AVANCES NORMATIVOS EN COLOMBIA

Con el fin de mejorar y dar condiciones apropiadas que permitan la promoción de la electrificación del transporte en Colombia, se han aplicado algunas medidas que permiten el establecimiento de estaciones de recarga y aumenten al mismo tiempo la cantidad de automóviles eléctricos en circulación [17]. La figura 9 muestra las principales normas que aplican para los vehículos eléctricos y los sistemas de recarga:



INFRAESTRUCTURA DE CARGA	
NORMATIVIDAD	DEFINICIÓN
RETIE	Disposiciones y requerimientos técnicos para los sistemas de conexión y carga para los VEs.
NTC 2050	Recomendaciones relacionadas con los equipos para sistemas de carga externos a los VEs, ubicación de los cargadores para las baterías y disposición de los conectores.
NTC 2050 - 625	Requerimientos y disposiciones de los equipos utilizados para realizar la recarga de VEs, niveles de tensión y corriente y conectores.
IEC 61851-1	Indica el Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos.
SAE J1772	Indica el tipo de conector.
UL 991	Estándar para pruebas de controles relacionados con la seguridad.
UL 1998	Estándar para el software en componentes programables.
VEHÍCULO DE CARGA	
NORMATIVIDAD	DEFINICIÓN
UL 2594	Alimentación con voltaje de la fuente primaria de 600 V
UL 2231	Norma de seguridad para sistemas de protección personal
UL 2251	Estándar para los enchufes, receptáculos y acopladores

Figura 9. Normatividad y condiciones que rigen al transporte eléctrico en Colombia. [16]

Algunos de los aspectos en temas de seguridad que se contemplan en la normatividad existente: Los sistemas de carga de vehículos eléctricos deben ser instalados con tensiones normalizadas de acuerdo a los estándares manejados en Colombia. El cargador debe tener protección contra sobrevoltajes, arcos y sobrecorrientes para evitar accidentes. El equipo de carga debe estar marcado y etiquetado con datos como número de fases, potencia, voltaje y corriente de operación, entre otros. El proceso de instalación está regulado de acuerdo con la norma IEC 61851-1 o al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

## **2.6.RECONVERSIONES TECNOLÓGICAS DE VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA A VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

Diversas experiencias en transformaciones de vehículos de combustión interna a vehículo eléctrico se han realizado en Europa y América Latina. Principalmente en Latinoamérica en países como México, Chile, Brasil, Argentina y muy recientemente en Colombia.

En Colombia ya son varias las experiencias en transformaciones de vehículos de combustión a eléctricos, sin embargo, ninguna ha sido documentada formalmente. En ciudades como Bogotá, Medellín y Cali existen empresas que realizan conversiones de forma local.

En términos generales, y al basarse en referentes conceptuales sobre reconversiones, se puede decir que la conversión de un vehículo de combustión interna a vehículo eléctrico conlleva las siguientes actividades:

Selección de un sistema de tracción eléctrico, incluyendo: motor eléctrico, baterías para vehículos eléctricos, controlador, el cual es un componente fundamental en el funcionamiento del vehículo, este elemento es el que convierte y transforma las señales DC-DC y DC-AC respectivamente, se considera el “cerebro” del sistema de tracción eléctrico [18], convertidor DC-DC (elemento de vital importancia para un vehículo eléctrico) y el papel que juegan las señales que pasan a través de éste (señales PWM) [19]. Los criterios de selección dependen completamente de las condiciones de las que sea objeto la transformación. [20]

De la actividad anterior es posible seleccionar un vehículo apropiado según las especificaciones técnicas del sistema de tracción eléctrico. A pesar de ello, no sólo basta comparar la potencia y el par de torsión del vehículo de combustión con los que demanda el sistema de tracción eléctrico, es necesario observar también la disposición de espacio y la estructura general del vehículo, los apoyos estructurales, el tipo de caja de velocidades (manual o automática) y su respectiva ubicación, tracción delantera o trasera, sistema de frenado e incluso el sistema eléctrico del vehículo (de su complejidad depende el acoplamiento con el nuevo sistema de tracción eléctrico).[21]

Si bien es evidente, no sobra mencionar que se requiere desmontar el motor de combustión interna y desensamblarlo de la caja de velocidades. Este proceso es importante, ya que debe realizarse con especial cuidado de no averiar los apoyos estructurales del vehículo, los cuales servirán para sostener el sistema de tracción eléctrico. Para realizar el ensamble del conjunto motor eléctrico-caja de velocidades es fundamental el diseño de piezas tales como: acople (es el componente que transmite la potencia y par de torsión del motor eléctrico a la caja de velocidades), la placa de adaptación (es la encargada de unir la carcasa del motor eléctrico con la carcasa de la caja de velocidades proporcionando rigidez al conjunto), sistema de sujeción del motor eléctrico (el cuál sostiene el motor eléctrico y lo mantiene anclado a los apoyos de la estructura del vehículo).

Luego de desmontar todo el sistema de combustión interna y de ensamblar el conjunto motor eléctrico-caja de velocidades, se realiza la instalación de todo el sistema de tracción eléctrico sobre la estructura del vehículo. Esta fase requiere de mucha concentración ya que debe seleccionarse el lugar más adecuado para cada componente según sus condiciones de funcionamiento.

Por otro lado, está lo que respecta optimización de espacio. Es claro que el componente que ocupa más espacio es la batería o bien el conjunto de baterías. En general cuando se realizan este tipo de transformaciones se reduce el peso del sistema de tracción, no obstante, es de vital importancia ubicar adecuadamente las baterías para no afectar el centro de masa del vehículo.

En la tabla 1 se presentan algunos vehículos convertidos a eléctricos de manera local:

Tabla 1. Vehículos eléctricos convertidos localmente.

	<p><b>Subaru Impreza 1995</b> [22]</p> <p>Motor: dos motores Siemens de corriente alterna (1/eje)</p> <p>Potencia: 270 HP</p> <p>Velocidad máxima: 193 km/h</p> <p>Baterías: 88 12V, Lithium-Polymer 70 Ah</p> <p>Controlador: Siemens 6SV1</p>
	<p><b>Geo Metro 1991 Convertible</b> [23]</p> <p>Motor: D&amp;D Systems Motor, Inc. ES-31B</p> <p>Potencia: 180 HP</p> <p>Velocidad máxima: 104 km/h</p> <p>Baterías: 10 Everstart 27VDC-6</p> <p>Controlador: Curtis 1221C 120V 400A</p>
	<p><b>Chevy s10</b> [24]</p> <p>Motor: Advanced DC 9.1 inch B</p> <p>Carga total: 102V</p> <p>Velocidad máxima: 97 km/h</p> <p>Baterías: 16 baterías de carro de golf en serie de 6V y 220 Ah</p> <p>Controlador: Curtis 1231C-860</p>
	<p><b>Volkswagen Vocho 72</b> [25]</p> <p>Baterías: 9 baterías de carro de golf. 72V</p> <p>Velocidad máxima: 66 <sup>km</sup>/h</p> <p>Transmisión: manual de 5 velocidades</p>

### 3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO

La dinámica de tracción del vehículo ha sido analizada para establecer los requerimientos de potencia en función de los diferentes parámetros, entre ellos importante la pendiente, teniendo en cuenta la topografía en la cual operará el vehículo (regularmente alta en la geografía colombiana). La ecuación (1) [26] determina la potencia requerida por el vehículo en movimiento, involucrando las componentes pendientes, rodadura, efecto aerodinámico y aceleración.

$$\dot{W} = \left[ W \sin \theta + C_r W \cos \theta + \frac{1}{2} \rho S K_a V^2 + m a \right] V \quad (1)$$

Dónde:

W: Peso

$\Theta$ : pendiente de la carretera

Cr: Coeficiente de rodadura

$\rho$ : Densidad del aire

S: Sección transversal del vehículo

Ka: Coeficiente aerodinámico

m: Masa

a: Aceleración

V: Velocidad.

La figura 10 presenta el comportamiento de la potencia y el par de torsión requerido en función de velocidad del vehículo, tomando como valores:

$m = 1025 \text{ kg}$  (675 kg vehículo + 5 pasajeros de 70 kg),  $C_r = 0,03$ ,  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $K_a = 0,2$ ,  $a = 0$  (velocidad constante),  $S = 1 \text{ m}^2$ ,  $\Theta = 0$  y  $10 \%$  (terreno plano y pendiente  $10 \%$ ).

Se espera que el vehículo supere velocidades de  $70 \text{ km/h}$  en condiciones estándar (terreno plano y velocidad constante) y que pueda desplazarse en cualquier pendiente colombiana (para este efecto la interacción con la caja de cambios original amplificará el par de torsión del motor).

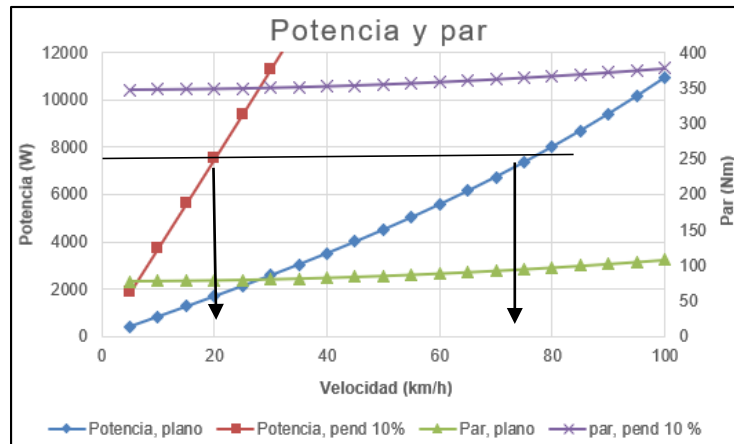


Figura 10. Potencia y par de torsión en función de la velocidad.

Un motor eléctrico de 10 HP (7,5 kW) puede satisfacer estas condiciones (figura 10), alcanzando velocidades de 75 km/h en terreno plano. No obstante, con una pendiente (alta) de alrededor del 10%, el vehículo alcanzará una velocidad de 20 km/h (Es preciso admitir que este vehículo con cupo completo reduzca su velocidad máxima en pendientes tan elevadas). En las carreteras colombianas (promedio latinoamericano) es necesario contar con caja de velocidades para lograr entregar el par de torsión requerido bajo condiciones exigentes de carga. Siendo así, se ha seleccionado un Kit AC de 72V conformado por los siguientes componentes:

- Controlador AC 72V 400A.
- Convertidor DC-DC Aislado 72/12-30.
- Cargador CH4100 72V 25A.
- Acelerador electrónico.
- Indicador de descarga de batería.
- Motor AC HPQ7.5YBE-72.
- Bomba Vacío 12V freno.
- Batería de Litio en Box de Metal con BMS incluido.

Se estudiaron diversas formas de adquirir el kit desde el país de origen, pero por múltiples complejidades en el proceso de compra, se requiere definitivamente intermediación con una empresa local, encontrando la mejor opción en términos de costos y confiabilidad.

### 3.1.PRUEBAS EN VACÍO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO

El sistema de tracción eléctrico debe ser verificado en funcionamiento antes de instalarse en el vehículo base para la reconversión, además, al observar detenida y separadamente el funcionamiento de los componentes es posible tener una mejor percepción de cuál es el lugar más adecuado para instalarlo en la estructura del vehículo base.

Se realizaron algunas pruebas sin carga para verificar el estado de los componentes y medir la potencia demandada sin carga. La figura 11 muestra un esquema de conexiones eléctricas.

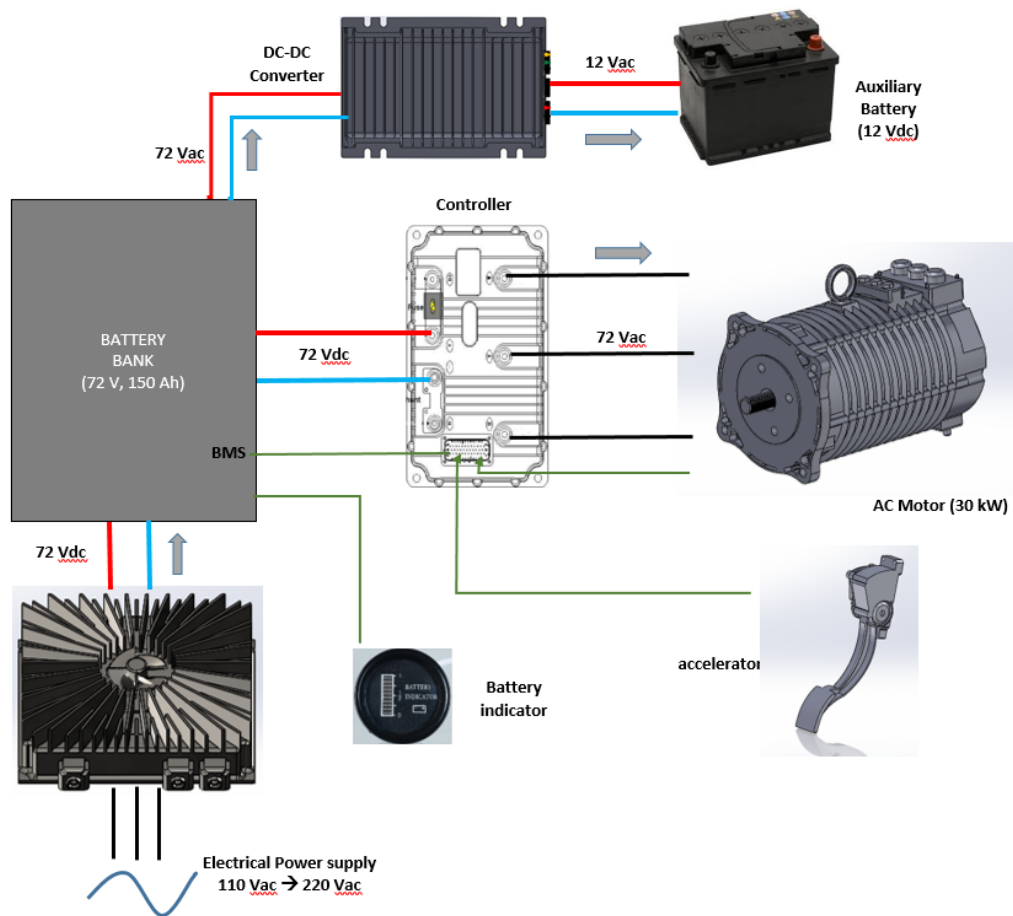


Figura 11. Esquema de conexiones eléctricas.

La corriente eléctrica demandada por el motor se midió en estas pruebas sin carga. La corriente máxima de 56 A y 72 V representa un consumo de 4032 W. En las pruebas iniciales, se probaron conexiones eléctricas satisfactorias y un buen desarrollo del sistema. La figura 12 muestra el montaje de prueba.



Figura 12. Ensamblaje de prueba inicial sin carga

Las pruebas de carga se realizaron con una potencia de suministro de 1700 W en conexión de 120 Vac (14 A). En este caso, la batería principal está casi llena, por lo tanto, se esperará una mayor corriente cuando se descargue la batería.

### **3.2.MODELADO 3D DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO SOBRE EL VEHÍCULO BASE**

El modelado 3D se ha convertido en una de las tendencias con más fuerza en el campo del diseño en los últimos años. La ciencia y la tecnología han experimentado un gran avance que nos ha permitido evolucionar a la hora de proyectar una idea.

Se realiza el modelado 3D con el fin de proyectar la ubicación de los componentes electrónicos sobre el vehículo base para la reconversión. Estableciendo limitantes tanto de espacio como de distribución de peso para no afectar el centro de masa del vehículo. En la figura 13, se ilustra la representación en modelado 3D del sistema de tracción eléctrico sobre el vehículo base para la reconversión.



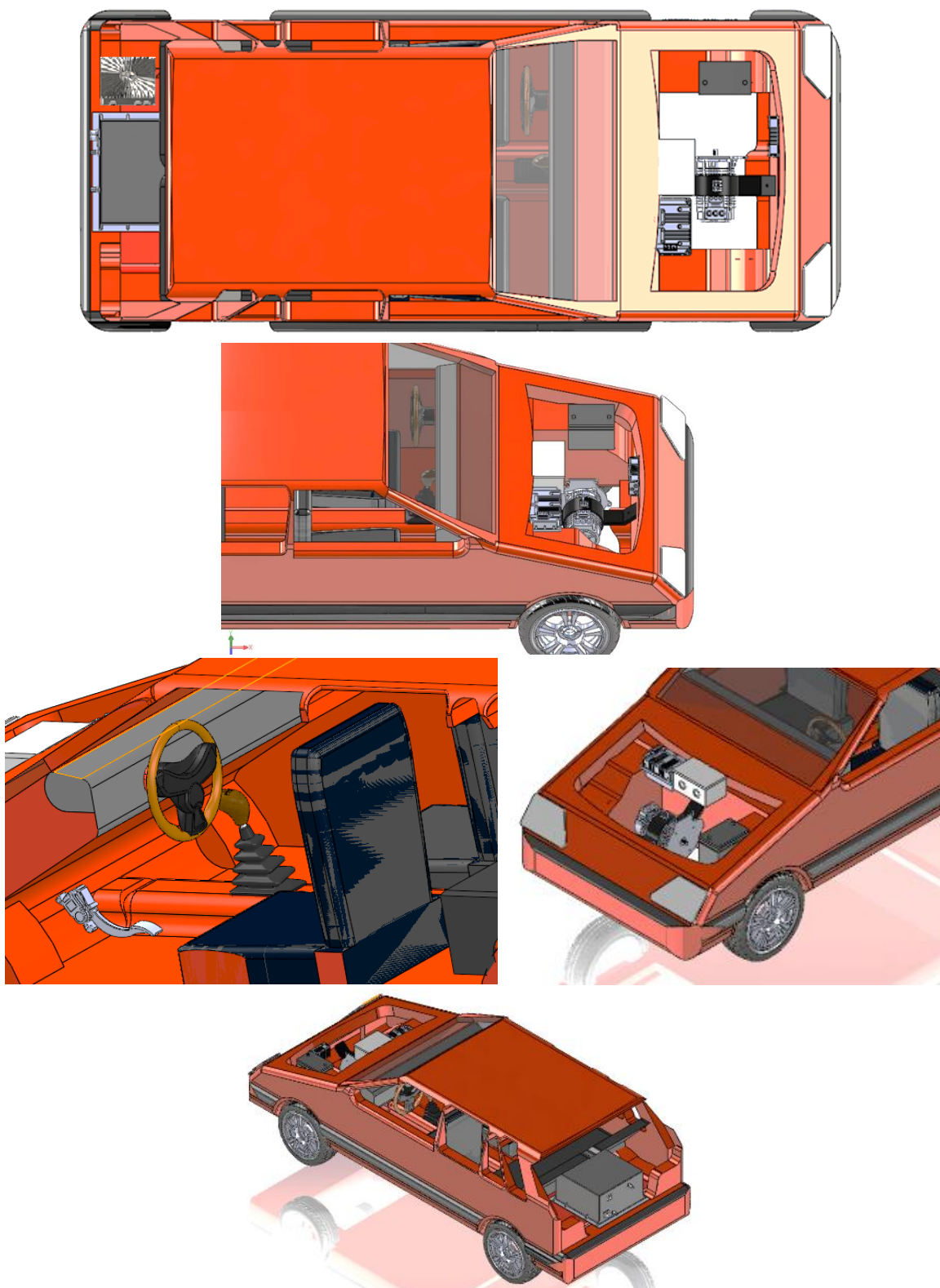


Figura 13. Representación en 3D del sistema de tracción eléctrico sobre el vehículo base para reconversión.

#### 4. SELECCIÓN DEL VEHÍCULO BASE LA RECONVERSIÓN

Al elegir el vehículo base para la transformación es necesario considerar los siguientes aspectos:

**Peso:** El peso del vehículo influye en la selección de la potencia del motor, debido a que, a mayor peso mayor es la resistencia al movimiento y por lo tanto mayor potencia de consumo. Así también el peso (o masa del vehículo) influye en las fuerzas debidas a aceleración y a la rodadura (ver ecuación 1). De esta manera, es fundamental establecer la potencia necesaria para poder mover el vehículo en las condiciones normales de conducción.

**Caja de velocidades:** El vehículo puede tener una caja de velocidades manual o automática, sin embargo, se prefiere tener una caja de velocidades manual, puesto que las automáticas necesitan que el motor esté siempre en movimiento porque deben mantener la presión interna del líquido de caja. Generalmente la presión de la caja de velocidades automática es mantenida por el ralentí del motor (revoluciones del motor cuando el vehículo está estático). Si se desea realizar la conversión en un vehículo con caja de velocidades automática, se debe agregar una pequeña bomba que permita mantener la presión necesaria en la caja. Esta instalación es compleja y costosa, por lo tanto, se recomienda un vehículo con la caja de velocidades manual, ya que es fácil de trabajar y no necesita ningún dispositivo externo para su correcto funcionamiento. [27]

**Frenos:** Los frenos son una parte importante del vehículo, debido a que es un elemento de seguridad imprescindible para un vehículo. Por tal motivo se debe tener conocimiento si el vehículo tiene frenos servo-asistidos o hidráulicos (sin asistencia). Esto es importante ya que los frenos servo-asistidos utilizan un sistema de bombeo especial que entrega la asistencia al conductor, mejorando el rendimiento y eficacia al momento de frenar. En cambio, los frenos normales dependen del conductor, es decir, de la fuerza aplicada al pedal. Si el vehículo eléctrico no tiene frenos servoasistidos y se encuentra en buenas condiciones, se pueden mantener los frenos originales del vehículo. En un vehículo eléctrico que utilice frenos servoasistidos, existe la alternativa de mantener el motor eléctrico con un ralentí generando vacío y proporcionar asistencia al frenado, pero esto no es recomendable ya que reduce la potencia del vehículo. Otra solución existente para los frenos asistidos, es la incorporación de una pequeña bomba de vacío,

la cual permite mantener la presión necesaria en el sistema de frenos.

**Tipo de tracción:** Otro factor importante es el tipo de tracción que tiene el vehículo, es decir, si su tracción es trasera o delantera. Para tracción trasera, el motor debe ser instalado en línea a lo largo del vehículo, es decir, conectado en forma directa a la caja de velocidades, que a su vez está unida a través de un eje al diferencial trasero. Si se tiene un vehículo con tracción delantera, el motor deberá ser instalado en forma transversal a lo largo del vehículo, y conectado en forma directa a la caja de velocidades que también está en forma transversal. [28]

**Tamaño y firmeza del vehículo:** El vehículo seleccionado debe tener espacio suficiente para la instalación de las baterías, del motor y de los componentes. Un espacio amplio facilitará el montaje de todo el sistema y permitirá el control de temperatura por enfriamiento de componentes en contacto con el aire circulante. Otra consideración importante es la rigidez y estabilidad del chasis, además de la ubicación del banco de almacenamiento, ya que, al instalar las baterías, el peso de estas puede afectar el centro de masa del vehículo, generando inestabilidad en las curvas y en los arranques, sufriendo con el tiempo daños estructurales.

Una de las ventajas de seleccionar un vehículo de baja gama es que son menos desarrollados tecnológicamente y la electrónica de potencia no es imprescindible para que otras funciones del vehículo sigan operativas. Un vehículo con dirección y frenos asistidos electrónicamente incrementan complejidad en la transformación, debido a su alta dependencia con el motor de combustión, requiriendo ser intervenidos a través de su sistema computarizado.

Se efectuaron diversos estudios de tracción para verificar la demanda en potencia que requiere un vehículo en función de su peso. Así mismo se observaron referentes de vehículos comerciales con información de su peso y potencia tal como se muestra en la Tabla 2.

La limitación en potencia se vio influenciada por la limitación del recurso disponible para satisfacer el sobre costo que implican los trámites de importación y de intermediación. Esta limitación en potencia obligaba a que el vehículo requerido posea un peso que no supere los 800 kg. En esta gama se hizo un estudio de vehículos en el mercado priorizando los siguientes:

Tabla 2. Vehículos candidatos para la conversión

Vehículo	Peso [kg]	Potencia [HP]	Relación Peso/Potencia [kg/HP]
Chevrolet spark 1.0	795	65	12,23
Chevrolet alto	762	63	12,1
Chevrolet sprint	675	46,77	14,43
Daewoo matiz	779	51	15,27
Daewoo Tico	640	48	13,33
Fiat 1	760	52,9	14,36
Chevrolet swift 1.0	780	69,1	11,28
Hyundai i10	880	65	13,53

Después de analizadas las opciones de vehículos (tabla 2), se ha optado por seleccionar el Chevrolet Sprint por su bajo peso, versatilidad y su disponibilidad comercial (ver figuras 14 y 15).



Figura 14. Vista lateral del vehículo base para la conversión



Figura 15. Vista frontal vehículo base para conversión.

#### 4.1.PRUEBAS PRELIMINARES DEL VEHÍCULO BASE

Las pruebas de combustión son importantes para determinar cuánta polución emite el vehículo a la atmósfera. Para esto, se desarrollaron las pruebas dinámicas con base en el protocolo NEDC (New European driving Cycle) para evaluar consumo de combustible y emisiones contaminantes. La figura 16 presenta el ciclo empleado.

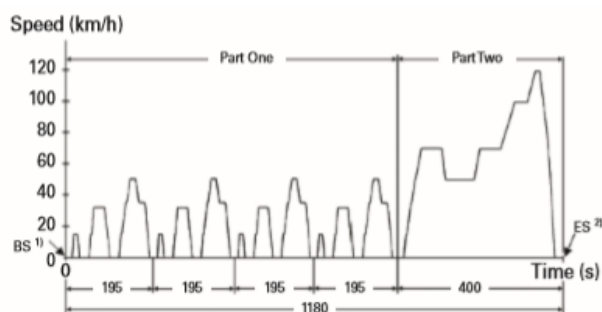


Figura 16.Ciclo de conducción: NEDC. Urbano (ECE), Extra Urbano (EUDC) [29]

Durante las pruebas, el consumo de combustible promedio fue de 57,78 km/galón (6,54 L/100 km). Los gases de combustión obtenidos fueron CO: 1,808 g/km, THC + NOx: 0,652 g/km. Los valores mostraron que se sobrepasan los límites internacionales establecidos, los cuales para este tipo de vehiculos y de acuerdo a los estándares [5] (Euro 4) son: CO: 1,0 g/km y HC + NOx: 0,3 g/km. En Colombia, los vehículos son evaluados con base en el protocolo Euro 2 (resolución 910 de 2008), que establece límites como CO: 2,20 g/km y HC+NOx: 0,50 g/km. Teniendo en cuenta los resultados el vehiculo seleccionado es altamente propicio para la conversion.

## 5. DESMONTAJE DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Se presenta a continuación el proceso de desmontaje del motor de combustión interna. En este proceso se debe tener exhaustiva precaución de no afectar elementos clave que servirán de apoyos estructurales a los componentes del sistema de tracción eléctrico. La figura 17 presenta el motor de combustión en su estado original.



Figura 17. Vehículo base antes de la transformación.

Para llevar a cabo las operaciones de desmontaje del motor de combustión es necesario contar con un equipo completo, que combina herramientas comunes y de uso general en el taller, con otras que son más especializadas.

Por una parte, están las herramientas de mano básicas que no pueden faltar en tareas de este tipo. Entre ellas se encuentran las llaves (planas, en ángulo, de tubo, de estrella, fijas, extensibles, llaves Allen), los destornilladores (planos, de estrella, con punta intercambiable), los alicates y las herramientas de impacto (mazas, matillos de acero, plástico o madera, destornilladores de impacto, etc.). También es necesario el apoyo de herramientas de soporte, como la grúa elevadora, la cual se usa para extraer el motor del vehículo.

Se han utilizado las instalaciones y capacidades de un taller de mecánica reconocido de la región (Figura 18) que cuenta con las herramientas anteriormente mencionadas. Además, el taller cuenta con mano de obra calificada, esto es una gran ventaja ya que para realizar el desmontaje se debe tener especial cuidado con el desensamble de todos los componentes.





Figura 18. Taller de mecánica reconocido en la región utilizado para la transformación

La primera tarea consiste en retirar el capó para facilitar la maniobrabilidad y evitar que esta pieza pueda estorbar durante el proceso, como por ejemplo al elevar el motor con la grúa. También, es de vital importancia desconectar los cables de la batería para evitar accidentes. (Ver figura 19)



Figura 19. Desmontaje del capó.

Seguidamente se procede a quitar los tubos y mangueras del sistema de admisión de aire junto con el filtro tal como se ilustra en la figura 20. De igual forma se desmonta el carburador.

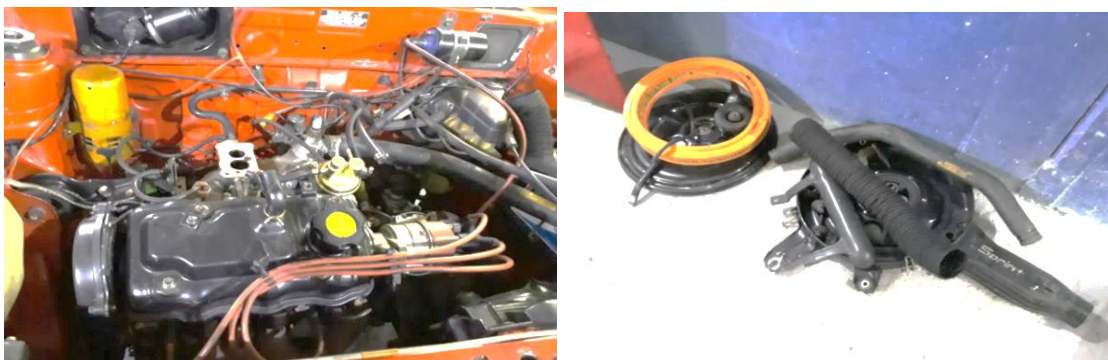


Figura 20. Desmontaje de mangueras y ductos de aire.

Seguidamente se debe drenar los líquidos que hay en el motor. Esto incluye el aceite, la gasolina, el líquido de transmisión y el refrigerante. Es fundamental colocar algún recipiente debajo de los tubos y conductos para recoger los líquidos extraídos (cada uno en su recipiente, para poder llevarlos a puntos de reciclaje).

A continuación, se quitan todos aquellos cables, conectores y enganches que unen al motor con la carrocería. Esto incluye retirar los conductos de aire de refrigeración, mangueras de calefacción y aire acondicionado, radiador, tanque de gasolina y tubo de escape con el silenciador, tal como se muestra en la Figura 21. También se realiza la extracción de los semiejes que se acoplan con el diferencial delantero. Se debe tener especial cuidado con el sistema eléctrico del vehículo ya existente para no perder las conexiones de los dispositivos auxiliares.



Figura 21. Extracción de tubo de escape, radiador, semiejes y tanque de gasolina.

Luego de tener el conjunto motor-caja completamente desacoplado del chasis y demás componentes del vehículo, se realiza el desmontaje cuidadosamente. Esto se hace con unas cadenas que son lo suficientemente fuertes para amarrar al motor por la sección del Carter y otros elementos que sobresalen del bloque. Estas cadenas se unen a una grúa para poderlo extraer del vehículo. Con la grúa, poco a poco se saca el motor para que esté completamente fuera del compartimiento del motor. (Ver figura 22)





Figura 22. Desmontaje del conjunto motor-caja.

En la figura 23 se ilustra el proceso de desensamble entre el motor de la caja de velocidades. Se deben retirar con cuidado los tornillos que unen ambos elementos, y sujetar la transmisión con un elevador portátil cuando ésta ya no esté anclada al motor. Cuando la caja de velocidades está desmontada, se revisa su estado y limpieza que asegure el correcto funcionamiento.



Figura 23. Desensamble de la caja de velocidades y el motor de combustión.

Después se retira la tubería de alimentación de combustible desacoplando en primer lugar las bridas que unen la carcasa del vehículo con la tubería. Se desmonta el guardabarros trasero izquierdo para facilitar la extracción. (Ver figura 24)



Figura 24. Desmonte de la tubería de alimentación de combustible.

## 6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS

A la hora de realizar el diseño de los elementos mecánicos necesarios en la transformación, las principales características a tener en cuenta son la resistencia mecánica y el peso de los mismos. Desde luego, el peso es el parámetro más crítico en el diseño, debido a que, a mayor peso mayor es la resistencia al movimiento y por lo tanto mayor potencia demandada. Otro factor importante a tener en cuenta en el diseño de los componentes mecánicos, es que los componentes sean reemplazables fácilmente y dependan lo mínimo del resto de piezas, así se consigue optimizar el tiempo de construcción y el de reparación.

### 6.1.PLACA DE ADAPTACIÓN

Para lograr unir el conjunto motor-caja es necesario fabricar una placa que permita sujetar firmemente ambas partes. En esta transformación tecnológica no se utiliza embrague, al permitir efectuar cambios con la caja una vez el eje del motor se detiene al desactivar el pedal de aceleración. En ciudades relativamente planas como Bogotá, conducir en tercera o cuarta velocidad de transmisión es una opción viable. El vehículo transformado se asemeja de esta manera a un vehículo automático.

Dado que el aluminio tiene propiedades mecánicas que lo hacen muy útil en trabajos de ingeniería, tales como baja densidad ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), buena resistencia mecánica y a la corrosión, bajo costo y gran maleabilidad, se utiliza entonces una placa de aluminio de 9 mm de espesor.

Al tener las dimensiones de los bordes y la posición de los agujeros completamente definidos se realiza el modelado 3D de la placa, ver figura 25.

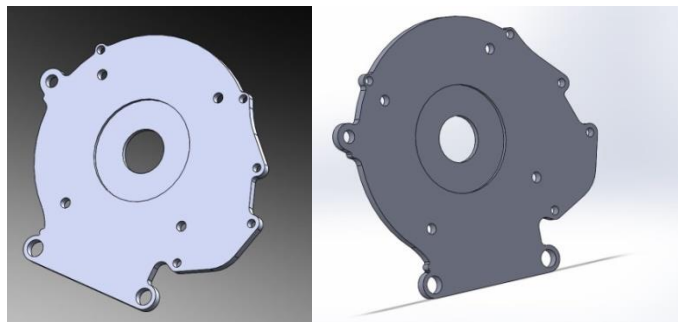


Figura 25. Placa de adaptación en 3D.

Como se puede ver en la figura 26, se inicia marcando el orificio de la posición del eje, los orificios de los tornillos y la silueta. Posteriormente se recorta la silueta y luego se pulen los bordes.



Figura 26. Recorte de la placa de adaptación.

Luego de tener la placa de adaptación cortada y pulida, se perforan los agujeros donde se ubican los pernos y demás elementos de sujeción. El agujero por donde pasa el acople se mecaniza por ambos lados de la placa, tal como se planteó en el modelado. (Ver figura 27)



Figura 27. Perforación de los agujeros de placa de adaptación.

Por último, se acopla el motor eléctrico y la caja de velocidades con la placa de adaptación, tal como se muestra en la figura 28, verificando así la estabilidad del conjunto para las posteriores pruebas en vacío del sistema.



Figura 28. Montaje de placa de adaptación en conjunto con el motor eléctrico y la caja de velocidades.

## 6.2.SISTEMA DE SUJECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

El sistema de sujeción debe fijar el motor eléctrico en su posición correspondiente, de tal manera que sirva para eliminar los movimientos radiales y ubicar la caja de velocidades en su posición original. En general, el sistema se ubica en las perforaciones con gomas de amortiguación de vibraciones que el vehículo utilizaba en el motor de combustión original, estas gomas son importantes, puesto que minimizan la transferencia de vibración a la carrocería, por otro lado, se utilizan los pernos originales, ya que son pernos especialmente diseñados para el soporte de motores. De esta forma, se tiene la seguridad de estar anclado a soportes del motor en un lugar diseñado para este objetivo. Se utiliza un sistema de abrazadera, el cual permite fijar el motor siempre en su posición en los soportes, tal como se ilustra en el esquema de la figura 29. Si bien la abrazadera no contra-resta la fuerza angular generada por el motor eléctrico, servirá satisfactoriamente para fijar el motor en su correcta posición.

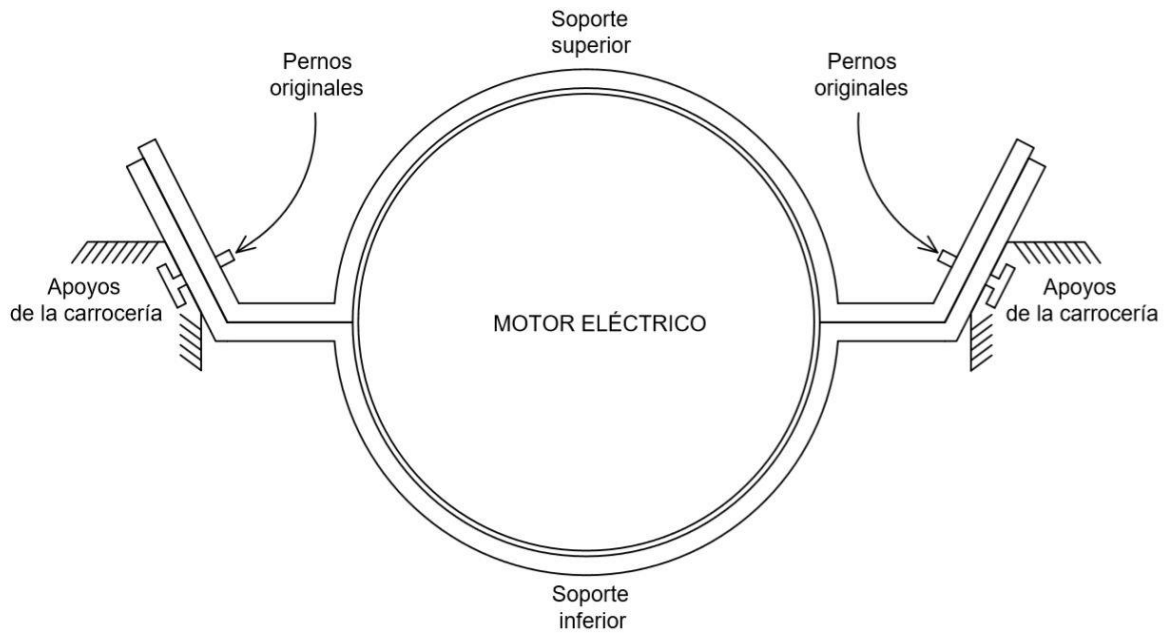


Figura 29. Esquema del sistema de sujeción del motor eléctrico.

Luego de realizar cuidadosamente el desmonte del motor de combustión interna, se revisa el estado de los apoyos de la carrocería del vehículo. En la figura 30 y 31 se puede ver la disposición de los apoyos estructurales del vehículo que se utilizan en el sistema de sujeción.



Figura 30. Apoyo 1 de la carrocería





Figura 31. Apoyo 2 de la carrocería

Para realizar el proceso de fabricación del sistema de sujeción se emplea el método de deformación plástica en frío, aplicando grandes cantidades de presión a una pieza de acero AISI 1020 de forma continua con la ayuda de prensas de rodillos tal como se muestra en la figura 32, el proceso consiste en colocar la pieza entre tres matrices de rodillos que al cerrarse y ajustarse conforman una cavidad con la forma y dimensiones que se desean.



Figura 32. Proceso de fabricación de sistema de sujeción del motor eléctrico.

A continuación, se ilustra en la figura 33 el modelado 3D de la pieza de sujeción.

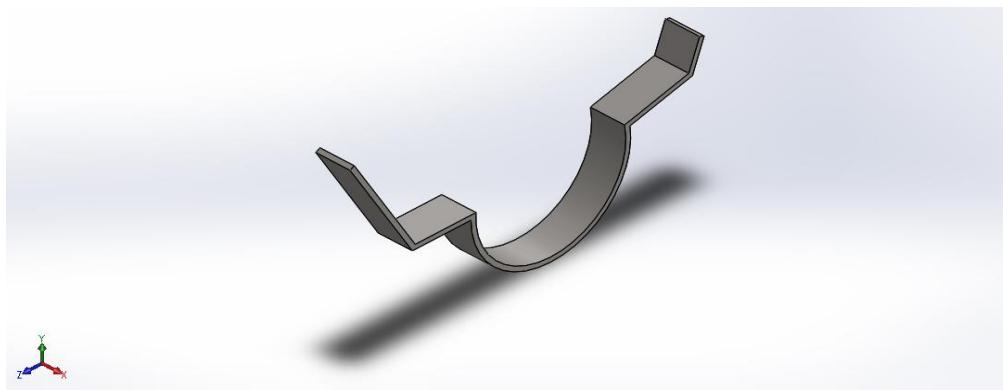


Figura 33. Modelado 3D sistema de sujeción del motor.

Luego de tener la pieza de sujeción modelada en 3D se realiza un análisis estático utilizando la herramienta de elementos finitos por medio de software computacional. Los parámetros del material a definir en el programa se presentan en la tabla 3, considerando que la pieza ha sido fabricada de acero AISI 1020. Es importante realizar esta simulación para tener una idea de cómo se comportan los concentradores de esfuerzo cuando se les somete a cargas. Sin embargo es de aclarar que esta simulación no tiene en cuenta el efecto de endurecimiento por deformación en los dobleces de la pieza.

Tabla 3. Propiedades del material de fabricación de la pieza de sujeción.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2,00E+11	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,29	-
Módulo cortante	7,70E+10	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	7900	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	420507000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión	420507000	N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	351571000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	1,50E-05	/K
Conductividad térmica	47	W/(m*K)
Calor específico	420	J/(kg*K)

En la figura 34 se presenta la ubicación de los soportes (apoyos donde va anclado el sistema de sujeción del motor eléctrico a la carrocería del vehículo) y las cargas a la que está sometida la pieza, que en este caso la única carga que estará soportando es el peso del motor eléctrico.

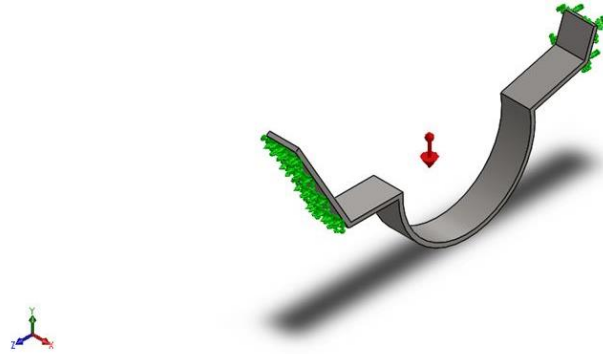


Figura 34. Ubicación de cargas en el software de simulación del sistema de sujeción.

El mallado es un paso crucial en el análisis de la pieza. El mallador automático en el software genera una malla basándose en un tamaño de elemento global, una tolerancia y especificaciones de control de malla. El control de malla le permite especificar diferentes tamaños de elementos de componentes, caras, aristas y vértices. El software estima un tamaño de elemento global para el modelo tomando en cuenta su volumen, área de superficie y otros detalles geométricos, tal como se aprecia en la figura 35.



Figura 35. Mallado en el software de simulación de sistema de sujeción.

Como se puede observar en la figura 36, se tiene un esfuerzo de Von Mises máximo y mínimo de  $3,45207e+007 \text{ N/m}^2$  y  $1,30031 \text{ N/m}^2$  respectivamente. Como era de esperarse, la zona más crítica se ubica en los dobleces de la pieza.



El factor de seguridad se obtiene de la relación entre límite de fluencia y el esfuerzo de Von-Mises

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Límite de fluencia (material dúctil)}}{\text{Esfuerzo de Von Mises}} = \frac{351571000 \text{ N/m}^2}{34520700 \text{ N/m}^2} = 10,184353$$

Tener un factor de seguridad de 10,184353 indica que hay una muy buena cobertura para solicitaciones de carga.

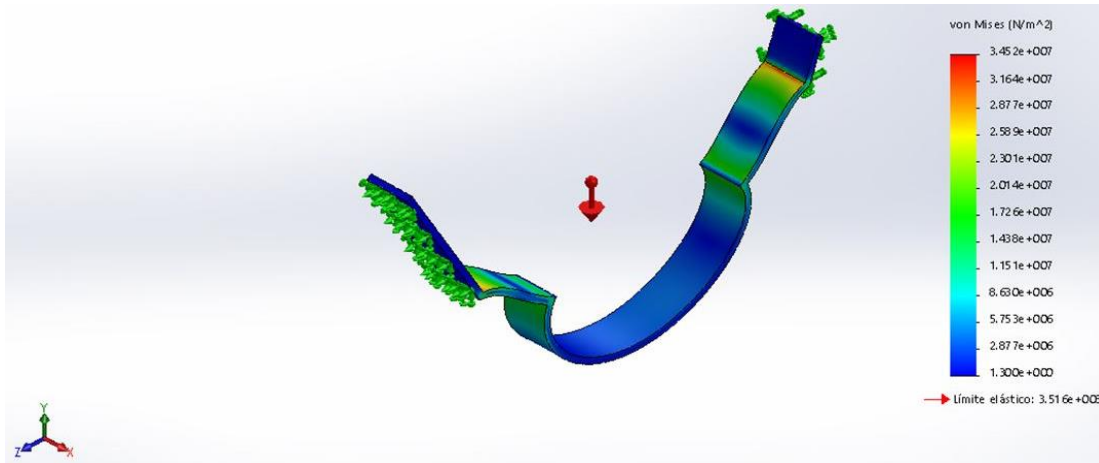


Figura 36. Esfuerzo Von Mises de sistema de sujeción.

En la figura 37 se ilustran las deformaciones y desplazamientos que siendo tan pequeñas no cambian la configuración geométrica de la pieza y su influencia sobre las solicitaciones de carga son prácticamente despreciables, por consiguiente, a los fines del equilibrio estático y determinación de fuerzas internas es como si la pieza en cuestión fuera indeformable.

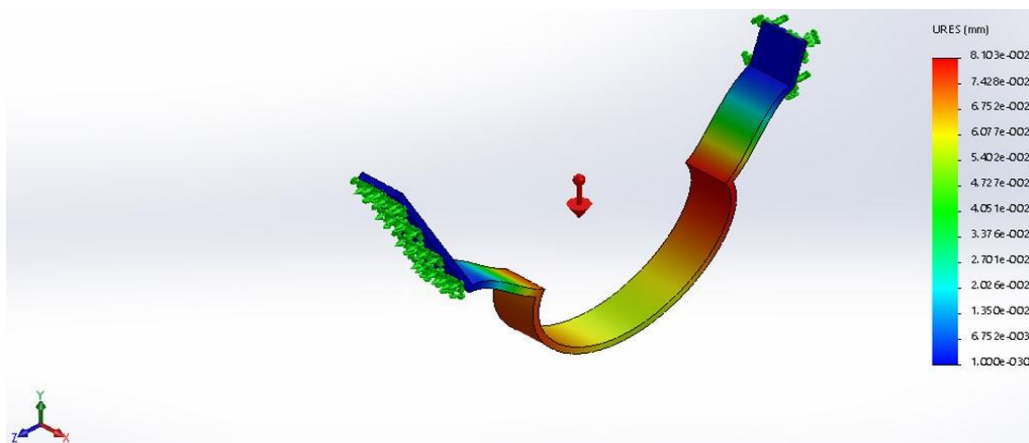


Figura 37. Deformaciones del sistema de sujeción.

### 6.3.CÁLCULO DE LA UNIÓN ESTRIADA ENTRE MANZANA DE ACOPLE Y EJE DE MOTOR ELÉCTRICO

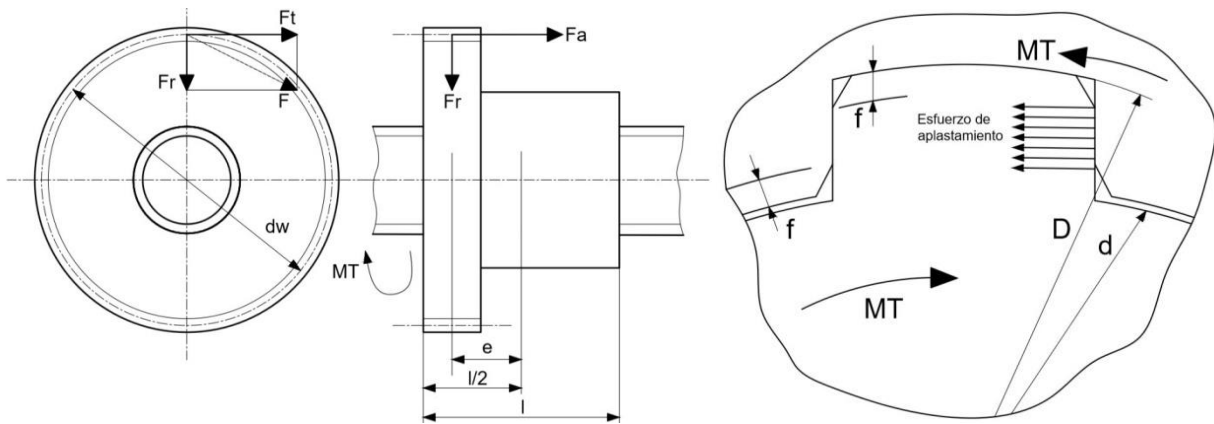


Figura 38. Esquemas de cálculo de las uniones estriadas utilizadas en las transmisiones de potencia mediante ruedas dentadas. [30]

Las principales consideraciones para tener en cuenta en el diseño y estimación de la capacidad de trabajo de la unión estriada son la resistencia de las superficies de trabajo de los dientes al aplastamiento y al desgaste corrosivo mecánico. El desgaste corrosivo mecánico aparece bajo condiciones de pequeños desplazamientos oscilatorios relativos de las superficies conjugadas, asociados a las deformaciones y las holguras. Es fácil entender que las deformaciones cíclicas de flexión del árbol giratorio se extienden al orificio de la manzana y se acompañan de pequeños desplazamientos relativos. Las deformaciones de torsión del árbol también van acompañadas de pequeños desplazamientos, pero son cíclicos sólo en la medida que el par de torsión sea variable. Si la unión con árbol giratorio se carga con una carga transversal  $F$  tal como se ilustra en la figura 38, con dirección constante (por ejemplo, la fuerza en una transmisión dentada), entonces las holguras en la unión se desplazan de un lado para otro y esto es un proceso de desplazamientos oscilatorio. Además, la fuerza  $F = \sqrt{F_t^2 + F_r^2}$ , desplazada con respecto al centro de la manzana, forma un momento de vuelco  $M_v = F * e$ , que genera concentración de carga en el extremo más cercano de la manzana. [30]

### 6.3.1. ESFUERZO DE APLASTAMIENTO

Las investigaciones de las uniones estriadas han permitido metodologías estandarizadas para calcular su capacidad de carga (las metodologías estandarizadas contemplan la determinación de los esfuerzos permisibles, atendiendo a los concentradores de esfuerzos, la inexactitud de fabricación, etc.). Observando la figura 38 y asumiendo una distribución uniforme de la carga entre los dientes y a lo largo de los dientes, se puede formular la ecuación 2 [30].

$$\sigma_{apl} = \frac{2 * M_T}{z * h * d_m * l} = \frac{M_T}{S_F * l} \quad (2)$$

Dónde  $S_F = z * h * d_m / 2$  es el momento específico (por unidad de longitud) estático de área de las superficies de trabajo;  $l$  es la longitud de trabajo de los dientes;  $z$  es el número de dientes;  $d_m = 0,5 * (D + d)$  es el diámetro medio;  $h = 0,5 * (D - d) - 2 * f$  es la altura de trabajo de los dientes prismáticos; para los dientes de evolvente  $h \approx m$  y  $d_m = z * m$ , donde  $m$  es el módulo.

La unión estriada es fabricada para engranar con dientes de evolvente por lo que  $h \approx m$ , siendo así, se llega a la siguiente expresión,  $h = m = d_m / z$ , que al ser reemplazada en la ecuación 2, se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{apl} = \frac{2 * M_T}{z * \frac{d_m}{z} * d_m * l}$$

Luego de simplificar, se obtiene la ecuación 3, la cual determina el esfuerzo de aplastamiento de los dientes de la estría en función del par de torsión, el diámetro medio y la longitud de la estría. Cualquier variación en el diámetro medio por pequeña que sea causará un incremento o decremento considerable en el esfuerzo de aplastamiento en comparación con la variación de las demás variables.

$$\sigma_{apl} = \frac{2 * M_T}{d_m^2 * l} \quad (3)$$

La tabla 4 muestra los valores límite de esfuerzo admisible de aplastamiento en función del régimen de operación, de la dureza del material del árbol y la manzana y del tipo de ajuste de la manzana sobre el árbol. Si en una aplicación particular se conoce el valor del par de torsión

nominal y las demás magnitudes geométricas involucradas, es posible calcular el esfuerzo admisible de aplastamiento. En caso tal que éste último resultara ser menor a los expuestos en la tabla 4, indicaría que no se exceden los valores límites típicos obtenidos en la práctica.

Tabla 4. Esfuerzos admisibles de contacto para las uniones estriadas. [31]

Tipo de unión	Condiciones de operación	[ $\sigma_{apl}$ ], MPa	
		Superficie de los dientes	
		$\leq$ HB 350	$\geq$ HRC 40
No deslizantes	Trabajo pesado (con choques)	26...38	30...52
	Condiciones moderadas	45...75	75...105
	Trabajo suave	60...90	90...150
Deslizantes sin carga (por ejemplo, en las cajas de velocidades)	Trabajo pesado (con choques)	9...15	15...22
	Condiciones moderadas	15...22	22...45
	Trabajo suave	18...30	30...55
Deslizantes con transmisión de carga (por ejemplo, el árbol cardán de un automóvil)	Trabajo pesado (con choques)	—	2,5...7,5
	Condiciones moderadas	—	4...9
	Trabajo suave	—	7,5...15

El eje del motor eléctrico está fabricado con acero C45, el cual tiene un rango de dureza de 170-210 HB. El acople flexible está fabricado con un tipo de acero especial. Los aceros aleados o especiales contienen otros elementos, además de carbono, que modifican sus propiedades (generalmente mejorándolas). Considerando que la estría de menor dureza presentará condiciones más críticas de funcionamiento, se toma su rango de dureza como criterio de selección al observar la tabla 4. Para esta aplicación particular, se tiene un tipo de unión deslizante sin carga (no es recomendable que un elemento que trasmite par de torsión esté rigidizado completamente) y condiciones moderadas debido a que la topografía del suelo colombiano exige que varíe constantemente el par de torsión.

A continuación, se calculan los parámetros geométricos de la unión estriada:

$$d_m = 0,5 * (D + d) = 0,5 * (21,6 \text{ mm} + 23,8 \text{ mm}) = 22,7 \text{ mm}$$

$$l = 35 \text{ mm} \text{ (Según planos del motor eléctrico)}$$

El gráfico presentado en la figura 39 representa las curvas de comportamiento del motor eléctrico a implementar suministrada por el fabricante, de este gráfico, se puede observar que el par de torsión máximo se presenta bajas revoluciones y es aproximadamente  $T_n = 30 \text{ Nm}$

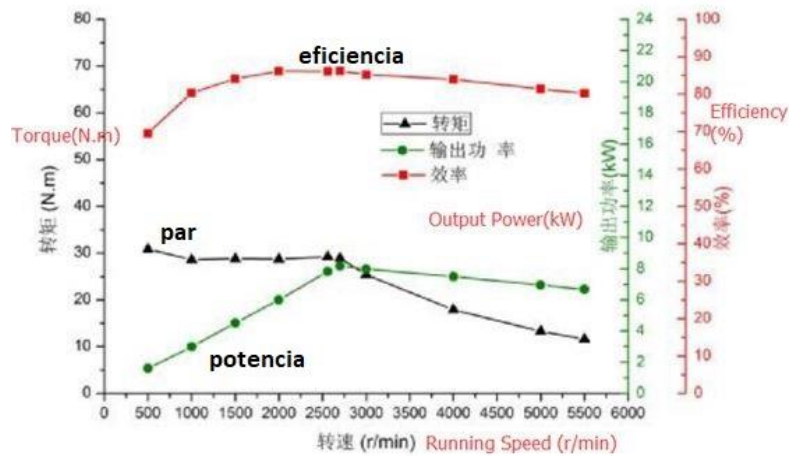


图1 额定特性曲线 Rated Characteristic Curve

Figura 39. Curva característica (valores nominales) suministrada por el fabricante del motor eléctrico. [32]

Al reemplazar los valores en la ecuación 3 se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{apl} = \frac{2 * M_T}{d_m^2 * l} = \frac{2 * 30 \text{ Nm} * \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}}{(22,7 \text{ mm})^2 * 35 \text{ mm}} = 3,32 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de aplastamiento no supera los valores indicados por la literatura (ver en tabla 4 celda marcada con color), en términos prácticos, la unión estriada, bajo condiciones nominales, está trabajando en un régimen de operación seguro.

### 6.3.2. ESFUERZO AL DESGASTE

El cálculo por la ecuación 3 es la primera etapa de estimación del proyecto, durante la cual se determina el valor aproximado del esfuerzo de aplastamiento permisible. En la segunda etapa se tiene en cuenta el criterio de estabilidad al desgaste. Este cálculo se verifica a partir de la siguiente condición [30].

$$\sigma_{apl} \leq \sigma_{des} * \frac{K_N}{K_E * K_{ax} * K_{lub}} \quad (4)$$

$\sigma_{des}$  es el esfuerzo permisible al desgaste, en MPa (se toma de la tabla 6);  $K_N$  es el coeficiente de número de ciclos de carga de los dientes de la unión durante todo el periodo de servicio, es decir el número total de revoluciones de la unión con respecto al vector de la carga transversal,

$$K_N = \sqrt[3]{\frac{10^8}{N}} \quad (N \text{ es el número de ciclos de vida y se calcula como } N = n * t, \text{ donde } t \text{ es el}$$

tiempo total de uso expresado en horas y  $n$  es la velocidad de giro nominal expresada en rpm);  $K_E$  es el coeficiente de régimen de carga, el cual tiene en cuenta la influencia de variación de la carga en el proceso de explotación, se puede tomar de la tabla 5;  $K_{ax}$  es el coeficiente de movilidad axial de la unión,  $K_{ax} = 1$  si la unión no es deslizante,  $K_{ax} = 1,25$  es no deslizante sin carga,  $K_{ax} = 3$  si la unión es deslizante con carga;  $K_{lub}$  es el coeficiente de condiciones de lubricación de las uniones móviles,  $K_{lub} = 0,7$  si la lubricación es filtrada,  $K_{lub} = 1$  si la lubricación es monitoreada,  $K_{lub} = 1,4$  si la lubricación no es filtrada. [30]

Se toman los siguientes valores:

$K_{lub} = 1,4 \rightarrow$  Lubricación no filtrada. (Los acoples flexibles generalmente no se lubrican)

$K_{ax} = 3 \rightarrow$  Deslizante con carga. (Existe deslizamiento axial entre el árbol y la manzana)

La tabla 5 ilustra los valores del coeficiente de régimen de carga para diversas aplicaciones.

Tabla 5. Guía de selección del coeficiente de régimen de carga. [31]

Regímenes típicos de carga	Denotación del régimen	Coeficiente de régimen de carga KE
Carga constante	0	1
La mayor parte del tiempo el trabajo es de elevadas cargas.	I	0,77
El tiempo de operación con todos los valores de carga es el mismo.	II	0,63
La mayor parte del tiempo las cargas son moderadas.	III	0,57
La mayor parte del tiempo las cargas son livianas.	IV	0,43

$K_E = 0,57 \rightarrow$  La mayor parte del tiempo las cargas moderadas. (Ver tabla 5)

Al determinar el coeficiente de número de ciclos de carga, se toma  $n=3000$  rpm (según datos de placa del motor eléctrico) y  $t=10000$  h, teniendo lo siguiente:

$$K_N = \sqrt[3]{\frac{10^8}{N}} = \sqrt[3]{\frac{10^8}{n * t}} = \sqrt[3]{\frac{10^8}{(3000 \frac{rev}{min} * 60 \frac{min}{1h}) * 10000 h}} = 0,38$$

Para estimar el esfuerzo permisible convencional al desgaste se tienen en cuenta parámetros geométricos de la configuración estriada relacionados con el punto de aplicación del par de torsión. Estas relaciones se representan en las ecuaciones 5 y 6.

$$\psi = \frac{d_m}{d_w} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{l} \quad (6)$$

Donde  $d_m$  es el diámetro medio de la estría;  $d_w$  es el diámetro de paso de la rueda dentada que comunica el par de torsión, debe aclararse que para esta aplicación  $d_m$  y  $d_w$  son idénticos debido a que la carga transversal no está siendo transmitida por un engranaje de dientes rectos (tal como lo muestra la figura 38) sino por la estría del eje del motor eléctrico;  $e$  es la distancia del punto de

aplicación del par de torsión al centro longitudinal de la estría;  $l$  es la longitud de trabajo de los dientes. Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, se reemplazan los valores en las ecuaciones 5 y 6 obteniendo lo siguiente:

$$\psi = \frac{d_m}{d_w} = \frac{22,7 \text{ mm}}{22,7 \text{ mm}} = 1$$

$$\varepsilon = \frac{e}{l} = \frac{0 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = 0$$

Las inexactitudes de cálculo debidas a las simplificaciones y asunciones hechas en la ecuación 4, se compensan en la selección del esfuerzo permisible de desgaste. Como se mencionó anteriormente, el material de las superficies de trabajo es de acero C45 con 170-210 HB. Con  $\Psi=1$  y  $\varepsilon=0$  se selecciona un esfuerzo de desgaste de 47 MPa de acuerdo a la tabla 6.

Tabla 6. Esfuerzo permisible convencional de desgaste en MPa. [31]

$\Psi$	$\varepsilon$	Tratamiento térmico y dureza promedio					
		Sin tratamiento térmico, HB270	Bonificado, HB270	Temple			Cementación o nitrurado, HRC60
				HRC40	HRC45	HRC52	
0,35	0	73	85	105	130	142	158
	0,25	52	60	77	97	105	117
	0,5	38	45	60	75	80	90
0,5	0	47	55	67	85	92	100
	0,25	32	37	47	60	66	72
	0,5	22	26	34	42	45	50

Ahora, se reemplazan los valores de los coeficientes de trabajo y los esfuerzos de aplastamiento y desgaste en la ecuación 4:

$$3,22 \text{ MPa} \leq 47 \text{ MPa} * \frac{0,38}{0,57 * 3 * 1,4}$$

$$3,22 \text{ MPa} \leq 7,46 \text{ MPa}$$



La condición se cumple. Si no hubiera cumplido tendría que aumentarse la dureza del material de la manzana (acople flexible) sometiéndola a algún tipo de tratamiento térmico, o en su lugar, cambiar la manzana por una que esté hecha con un material de mayor dureza.

## 6.4.ACOPLE FLEXIBLE

No es difícil imaginar que siempre existirá alguna desalineación relativa entre el eje conductor (estría del motor eléctrico) y el eje conducido (estría de la caja de velocidades), por lo que es recomendable utilizar un acople flexible. El propósito principal del acople flexible es transmitir el par de torsión requerido y compensar el desalineamiento angular, paralelo o una combinación de ambos, con numerosas funciones complementarias como proporcionar desplazamiento axial y así mismo restringirlo.

Por disponibilidad de consecución en el mercado Colombiano se opta por conseguir el acople flexible en INTERMEC S.A, la cual es una industria Metal-Mecánica especializada en la fabricación de elementos mecánicos para transmisión de potencia, localizada en Bogotá. Todas las piezas hechas por esta empresa son fabricadas con aceros especiales y bajo normas internacionales. La empresa INTERMEC S.A tiene su línea de acoples flexibles de torsión INTERFLEX. Los acoples INTERFLEX constan de dos manzanas de “mandíbulas” curvas que encajan con una “estrella” de poliuretano de por medio (figura 40).



Figura 40. Acople flexible INTERFLEX. [33]

Esta geometría le sirve para admitir buen desalineamiento angular y también transmitir con suavidad mayor torsión. El diseño es el estándar en Europa y muchos otros países alrededor del mundo [33]. Los acoples flexibles son altamente confiables para transmitir potencia en todo tipo de motores eléctricos o de combustión interna y se aplican comúnmente en bombas, cajas reductoras de velocidad, compresores, ventiladores, mezcladores, transportadores, generadores etc. Otros beneficios de estos acoples son:

- Facilidad de montaje y conexión axial.
- Buena capacidad de absorción de vibraciones.
- Libres de mantenimiento (no requieren lubricación).
- A prueba de fallas (siguen trabajando aún si el elastómero se daña).
- Resistentes al aceite, polvo, arena, grasa, humedad y muchos solventes.

Por la casi inexistente “holgura o juego” entre sus componentes, ofrecen gran precisión de posicionamiento. Para la selección del acople flexible, es necesario reunir la siguiente información: HP Y RPM del motor, o bien el par de torsión nominal, diámetros de los ejes y cuñeros del eje motriz y del conducido, tipo de aplicación y tipo de motor, condiciones ambientales extremas a las que vaya a estar sometido el acople (temperatura, corrosión, abrasión, limitación de espacio, etc.).

#### **6.4.1. DETERMINACIÓN DEL PAR DE TORSIÓN NOMINAL**

El gráfico presentado en la figura 39 representa las curvas de comportamiento del motor eléctrico a implementar suministrada por el fabricante. Como ya se mencionó, el par de torsión máximo se presenta bajas revoluciones y es aproximadamente  $T_n = 30 \text{ Nm} = 265,7 \text{ lb} - \text{in}$

#### **6.4.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SERVICIO**

Debido a que la topografía colombiana exige que el motor eléctrico cambie constantemente el valor del par de torsión y considerando además la suavidad del conductor al presionar el pedal del acelerador súbitamente, se pueden llegar a generar cambios bruscos en la transmisión del par de torsión, siendo así, por seguridad se toma como operación fluctuante con choques y alto par de torsión. Con la información anteriormente mencionada y al observar la tabla 7 se selecciona un factor de servicio de 2,0.

Tabla 7. Factores de servicio según la aplicación del motor.

TIPO DE TRABAJO O MÁQUINA	Motor eléctrico		Motor de combustión interna			
	Torque estándar	Alto par de torsión	4 ó más cilindros	3 cilindros	2 cilindros	1 cilindro
<b>Operación uniforme:</b> Ejemplo: Bombas hidráulicas y centrífugas, generadores livianos, ventiladores, sopladores, transportadores de banda y tornillo.	1,0	1,25	1,5	1,7	2,0	2,7
<b>Operación uniforme con fluctuación moderada:</b> Máquinas para el trabajo de la madera, molinos, maquinaria textil, mezcladores.	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	3,0
<b>Operación fluctuante:</b> Hornos rotativos, máquinas litográficas y de impresión, generadores, bombas para líquidos viscosos.	1,8	1,9	2,2	2,5	2,7	3,1
<b>Operación fluctuante con choques:</b> Mezcladoras de concreto, martinets, molinos para papel, bombas de compresión, bombas de propela, entorchadoras de cable, centrífugas.	1,8	2,0	2,5	2,7	3,0	3,4
<b>Operación muy fluctuante con choques:</b> Excavadoras, molinos de bolas, bombas de pistón, prensas de forja y estampado.	2,1	2,3	2,7	3,0	3,4	3,8
<b>Trabajo pesado, muy fluctuante con choques fuertes:</b> Compresores y bombas de pistón, movimiento de rodillos pesados, extrusoras de ladrillo, prensas mandíbula para moler piedra.	2,5	3,1	3,3	3,6	4,0	4,5

### 6.4.3. CÁLCULO DEL “PAR DE TORSIÓN DE DISEÑO” [TD] REQUERIDO

Multiplicando el “Par de torsión” por el factor de servicio se tiene lo siguiente:

$$T_d = T_n * F_s = 30 \text{ N-m} * 2,0 = 60 \text{ N-m} = 531,4 \text{ lb-in}$$

### 6.4.4. SELECCIÓN DEL ACOUPLE

La tabla 8 presenta la denominación de los acoples disponibles según los pares de torsión nominal y de diseño. Se selecciona el acople cuyos valores de “Par de torsión Nominal” [Tn] y “Par de torsión de Diseño” [Td] sean superiores a los obtenidos anteriormente. Se verifica que las columnas de “Hueco máximo manzana escalonada” y “Hueco máximo manzana lisa” del acople seleccionado admita los ejes a acoplar. Los diámetros de los ejes del motor eléctrico y de la caja de velocidades son 24 mm y 18,5 mm respectivamente. Ahora, con  $T_n = 265,7 \text{ lb-in}$  y  $T_d =$

531,4 *lb-in* y dado la importancia del acople en cuanto a las cargas que debe resistir se selecciona el acople GE28.

Tabla 8. Denominación de los acoples, datos de entrada Tn y Td

INTERFL EX No.	Dimensiones mm				Par de torsión nominal [Tn] lb-in	Par de torsión de diseño [Td] lb-in	Diámetro del hueco máximo manzana escalonada [mm]	Diámetro del hueco máximo manzana lisa [mm]	RPM Máximas permisibles
	L	A	B	M					
GE14	34	30	30	23	66	133	-	16	19.000
GE19	64	40	30	39	89	177	19	24	14.000
GE24	76	55	40	46	310	620	24	32	10.600
GE28	88	65	50	56	841	1.682	28	38	8.500
GE38	111	78	66	66	1.682	3.363	38	45	7.100
GE42	123	94	75	73	2.345	4.691	42	55	6.000
GE48	137	104	85	81	2.744	5.487	48	60	5.600
GE55	156	118	98	92	3.319	6.638	55	70	4.750
GE65	180	134	115	115	3.761	7.523	65	75	4.250
GE75	205	160	135	120	8.629	17.257	75	90	3.550
GE90	240	200	160	140	21.240	42.480	90	100	2.800

La figura 41 presenta el esquema y las dimensiones del acople flexible, según valores de la tabla 8.

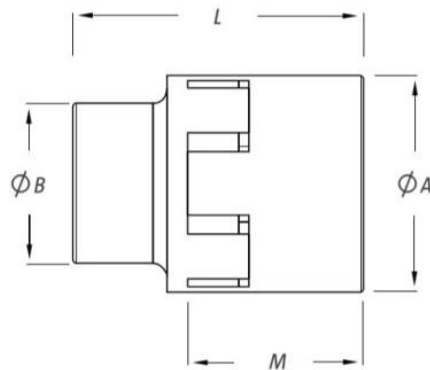


Figura 41. Esquema y dimensiones del acople flexible. [33]

#### 6.4.5. VERIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE ACOPLE SEGÚN CRITERIO DE RPM PERMISIBLE

Según la figura 39 y al consultar la columna de “rpm máximos permisibles” en la tabla 8, el motor eléctrico proporciona una velocidad de rotación máxima de 5.500 RPM, mientras que el acople seleccionado permite desarrollar velocidades de hasta 8.500 RPM. Se verifica entonces que el acople cumple con esta condición.

#### 6.4.6. MODIFICACIONES REALIZADAS AL ACOPLE

Finalmente, las dimensiones del acople GE28 seleccionado son:

$$\varnothing_B = 50 \text{ mm} \quad \varnothing_A = 65 \text{ mm} \quad L = 88 \text{ mm} \quad M = 56 \text{ mm}$$

La primera modificación consiste en realizar los agujeros estriados con el proceso de electro lución, el cual se realiza en el Sena de Dosquebradas debido a que en esta instalación cuentan con la herramienta y maquinaria necesaria. En la figura 42 se observa el proceso de electro lución y las estrías terminadas.



Figura 42. Realización de estrías en el acople.

Para adecuar el acople es necesario modificarlo geométricamente ya que las dimensiones del espacio en el que se ubica son limitadas. La figura 43 muestra el esquema de la disposición de espacio del compartimiento que se forma al unir el conjunto motor-caja. Por lo tanto, se reduce la longitud total del acople hasta obtener un valor de 70,8 mm, de esta manera se refrentan 17,2 mm, permitiendo un deslizamiento de 2 mm.

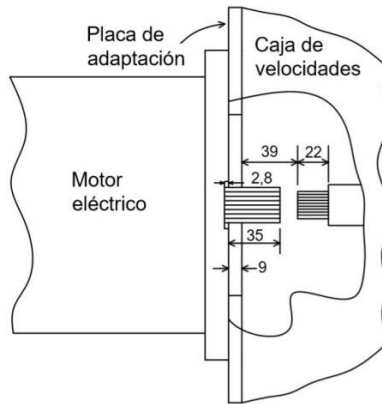


Figura 43. Esquema de disposición de espacio entre el conjunto motor-caja (medidas en mm).

Ahora, en la figura 44 se ilustran las dimensiones finales del acople luego de realizar las modificaciones requeridas.

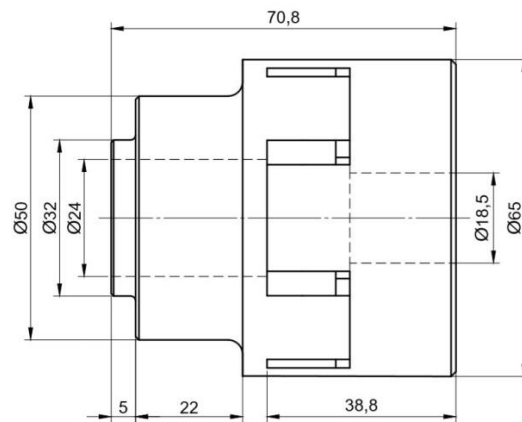


Figura 44. Dimensiones finales acople flexible (en mm).

Se realiza el modelado 3d para ofrecer una visualización más detallada de la configuración de los componentes del acople flexible, tal como se ilustra en la figura 45.

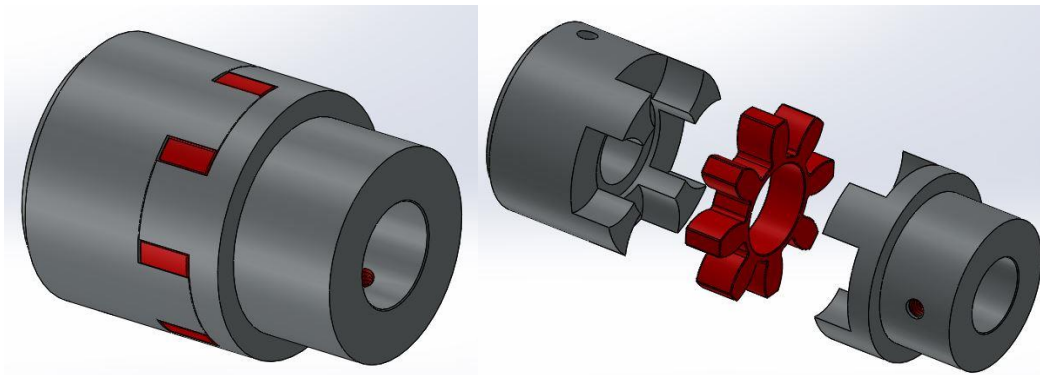


Figura 45. Modelado 3D del acople flexible.

## 7. MONTAJE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICO SOBRE EL VEHÍCULO BASE

Tras haber proyectado todo el sistema de tracción eléctrico sobre el vehículo base, se tiene idea general de los lugares más ideos de acuerdo con las funciones de cada componente. En este capítulo se ilustra de manera resumida con ayuda de imágenes, el proceso de instalación de todo el sistema de tracción eléctrico sobre el vehículo base para la reconversión.

En la figura 46 se presenta el circuito de conexiones del sistema de tracción eléctrico. Si bien el circuito es meramente informativo, la ubicación espacial que ilustra es la que se proyectó inicialmente con modelado 3D.

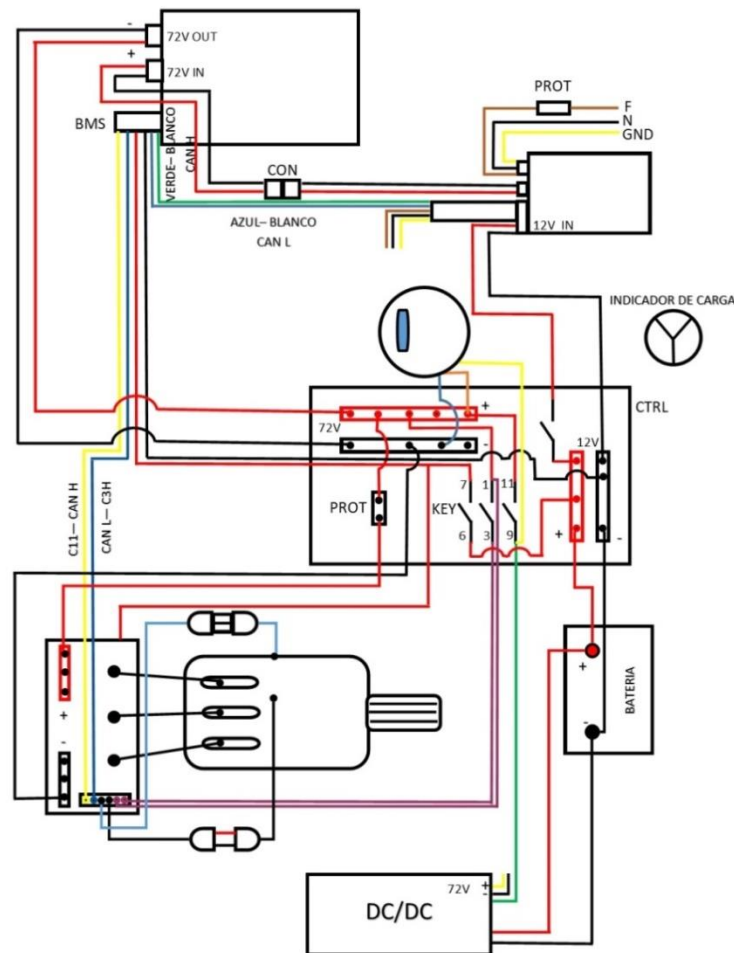


Figura 46. Circuito de conexiones del sistema de tracción eléctrico.

Uno de los principales componentes de todo vehículo eléctrico es la batería. Su importancia es tal que la autonomía y el precio del vehículo dependen del tipo y tamaño de la misma. Por la



limitación de espacio del vehículo base para la conversión, la batería se ubica en la cajuela del vehículo. En la figura 47 se muestra la ubicación de la batería en el vehículo base.



Figura 47. Montaje de la batería sobre el vehículo base para la reconversión.

Para la instalación del conjunto motor-caja sobre la estructura del vehículo base, fue necesario realizar primero el ensamble de las piezas previamente adaptadas: acople flexible, placa de adaptación y el sistema de sujeción del motor eléctrico, tal como se muestra en la figura 48

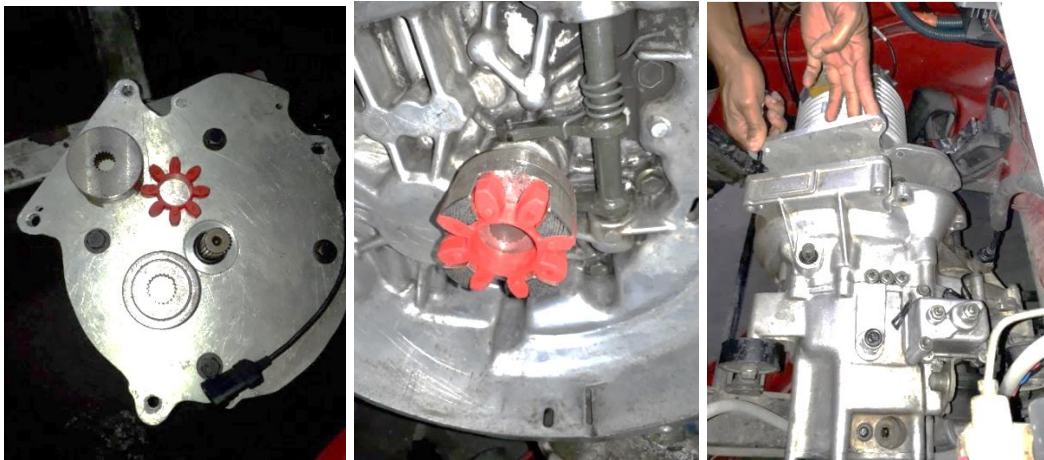


Figura 48. Ensamble del conjunto motor-caja.

Cuando se piensa en el montaje del sistema de tracción eléctrico, lo típico que suele pensarse es en ubicar el motor eléctrico donde estaba su homólogo de combustión, por supuesto, conviene colocarlo así gracias a la disposición de la caja de velocidades y a los apoyos estructurales del vehículo en donde reposaba el motor de combustión. En la figura 49 se puede apreciar la disposición de espacio en el compartimiento del motor.





Figura 49. Instalación del conjunto motor-caja sobre el vehículo base para la reconversión.

El controlador funciona también como inversor, el cual transforma la corriente directa proveniente de la batería en corriente alterna trifásica que va hacia el motor eléctrico. En lo posible, debe ubicarse cerca del motor eléctrico y del pedal del acelerador. Para su adecuación, fue necesario fabricar un soporte en aluminio y adherirlo a la carrocería del vehículo base en el compartimiento del motor, tal como se muestra en la figura 50.



Figura 50. Instalación del controlador sobre el vehículo base para la reconversión.

El convertidor DC-DC (72Vdc-12Vdc) reemplaza de cierta manera el alternador (del sistema de combustión) al mantener la batería auxiliar de 12 Vdc cargada a partir de la señal proveniente de la batería principal de litio a 72 Vdc. Su tamaño compacto hace muy versátil su ubicación sobre la estructura del vehículo base, a pesar de ello, conviene ubicarlo cerca de la batería de 12 V para facilitar la revisión del cableado en caso de que dejen de funcionar los componentes auxiliares. El convertidor es relativamente un componente sencillo, sin embargo, tiene un rol muy crítico en la operación del vehículo, sin este último la batería auxiliar no podría ser recargada constantemente y no suministraría la energía que requieren los componentes auxiliares, incluyendo el encendido

del vehículo. En la figura 51 se presenta la ubicación del convertidor DC-DC sobre la estructura del vehículo base, en este lugar se refrigera gracias al flujo de aire que entra por las rejillas de ventilación delanteras dando lugar a una convección forzada sobre la carcasa del convertidor.



Figura 51. Instalación del convertidor DC-DC sobre el vehículo base para reconversión.

Es fácil intuir que el cargador de la batería debe ubicarse lo más cerca posible a la batería, al conector de carga y al sistema de protección de carga, tal como se muestra en la figura 52.



Figura 52. Instalación del cargador de la batería en el vehículo base para reconversión.

El acelerador electrónico se ubica en el mismo lugar que el acelerador antiguo, esto con el fin de preservar el hábito de conducción. La figura 53 ilustra la ubicación del acelerador electrónico.



Figura 53. Instalación del acelerador electrónico en el vehículo base para la reconversión.

El conector de carga se instala en el mismo orificio por donde se vertía la gasolina en el vehículo tradicional de combustión (ver figura 54).



Figura 54. Instalación del conector de carga en vehículo base para la reconversión.

## 8. PRUEBAS PRELIMINARES EN EL DINAMÓMETRO DYNAPACK UTP

La prueba de potencia realizada en el laboratorio de pruebas dinámicas automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira (ver figura 55), está dirigida a automóviles 4x2 donde los ejes de tracción del automotor son acoplados al dinamómetro de cubos de marca DYNAPACK (ver figura 56). De esta manera se puede acelerar el motor en la marcha de prueba y transmitir el par de torsión a los cubos del dinamómetro donde un mecanismo de alta tecnología mide las variables de energía visualizando sus valores en pantalla y registrándolas en un computador para un posterior análisis [34].



Figura 55. Laboratorio de pruebas dinámicas automotrices.



Figura 56. Dinamómetro de cubos con el módulo DYNAPACK.

## 8.1. CÁLCULO PRELIMINAR DE LA AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

En la figura 57 se muestra la disposición del vehículo eléctrico en el laboratorio de pruebas dinámicas acoplado al dinamómetro de cubos con sus respectivos instrumentos de medición.



Figura 57. Vehículo eléctrico acoplado al dinamómetro de cubos.

Las condiciones de operación de la prueba fueron siguientes:

V= 65 km/h (constante)

Pendiente: 0°

Velocidad de transmisión: tercera velocidad

Energía consumida: 713,9 Wh durante 8 minutos (tomado del FLUKE 1736 POWER LOGGER)

Según la cinemática, cuando la velocidad es constante, el espacio recorrido se puede calcular como  $e = v * t$ , siendo así se sigue que:

$$e = v * t = 65 \frac{km}{h} * \frac{1 h}{60 min} * 8 min = 8,666 km$$

Esto indica que el vehículo logra recorrer 8,666 km con un gasto energético de 713,9 Wh. Al expresar estos resultados en términos de Wh/km se tiene lo siguiente:

$$\frac{713,9 Wh}{8,666 km} = 82,37 \frac{Wh}{km}$$

La relación anterior expresa que se necesitan 82,37 Wh para recorrer 1 km, sin embargo, en vehículos eléctricos no es usual expresar su rendimiento con este tipo de relaciones, en cambio,



se utiliza un valor promedio de kilómetros recorridos con el total de energía acumulada en banco de baterías, denominado Autonomía.

Es posible calcular un valor aproximado de la autonomía del vehículo eléctrico al considerar la capacidad energética de la batería. Según datos de placa, la batería tiene capacidad de suministrar 150 Ah a 72 V, lo que se traduce a 10800 Wh, de lo anterior se puede relacionar lo siguiente:

$$Autonomía = \frac{10800 \text{ Wh}}{82,37 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}} = 131,11 \text{ km}$$

Cabe resaltar que 131,11 km es simplemente un valor preliminar de autonomía.

Es un resultado relativamente bajo si se considera la capacidad energética de la batería, sin embargo, es importante mencionar que, al comienzo de cada ciclo de prueba, el vehículo demandaba una gran cantidad de potencia al tratar de vencer la inercia de los cubos del dinamómetro.

## **9. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES**

### **9.1.CONCLUSIONES**

Al contemplar (de manera aproximada) las variables que intervienen en la dinámica de tracción de un vehículo, se logró seleccionar con éxito un sistema de tracción eléctrico, cumpliendo a cabalidad las prestaciones de su homólogo de combustión.

Las pruebas realizadas en el vehículo de combustión (antes del cambio) mostraron que el consumo de gasolina de 6,54 L por 100 km y los niveles de contaminación fueron altos (CO: 1.808 g / km, THC + NOx: 0,652 g / km), superando los niveles internacionales admitidos niveles, generando un alto impacto negativo en la huella de carbono.

Se hizo un balance de masa. Los componentes eléctricos representan una reducción de peso total de 54 kg aproximadamente, disminuyendo la potencia de carga demandada y mejorando las condiciones del motor de potencia de salida.

Para el montaje fue necesario seleccionar y modificar la pieza de acople flexible entre el eje del motor eléctrico y el eje de la caja de velocidades. Esta pieza cuenta con dos estrías para acople con motor y con eje de caja y requiere un grado de concentricidad bastante alto.

Los costos implícitos representan una razón importante para realizar una conversión principalmente en nuestro contexto (América Latina). El costo total del kit eléctrico fue de aproximadamente 5000 USD (14.220.000 COP, cambia hoy). Un nuevo vehículo eléctrico es de 100.000.000 COP (muy caro), haciendo la conversión y una alternativa interesante. Ahora, el costo del combustible es de aproximadamente 8500 COP / gallon (3 USD) o 0,8 USD / L. El costo de kWh es de aproximadamente 530 COP / kWh (0,19 USD). Con un motor de combustión, el consumo del vehículo es de 6,54 L de combustible, que cuesta 5,232 USD. La carga total de la batería es de 150 Ah (72 V): 10800 Wh con una autonomía de 300 km. Por lo tanto, 100 km representa un consumo de 3600 Wh que cuesta 0,684 USD. En resumen, con un automóvil eléctrico, cada 100 km representa un ahorro de 4.548 USD (12935 COP), además de tener un impacto en la huella de carbono.

## **9.2.RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar un análisis de optimización topológica en la estructura del vehículo base, con el fin de reducir el peso del vehículo, y así mejorar las prestaciones en potencia.
- Debido a que en el vehículo eléctrico transformado (sin embrague) se pueden llegar a presentar choques bruscos en el momento de cambiar la velocidad de transmisión, se recomienda la implementación de un nuevo sistema de embrague para tracción eléctrica.
- Estudiar la implementación de un sistema de frenos electromagnéticos con el objetivo de eliminar el sistema tradicional de frenado por fricción.

## **9.3.APORTES**

La realización de este proyecto y su respectiva documentación deja los siguientes aportes:

- Gran cantidad de fuentes bibliográficas en cuanto a reconversión de vehículos eléctricos a térmicos, incluyendo: componentes de un sistema de tracción de MCI y un sistema de tracción eléctrico, análisis de eficiencia en transporte, medición de impacto ambiental, social y económico de los diferentes tipos de transporte.
- Una metodología de transformación de vehículo tradicional de combustión interna a vehículo eléctrico, contemplando etapas de diseño, implementación y montaje.
- Finalmente, se presentó a la sociedad y comunidad científica un vehículo (tradicional de combustión) completamente transformado a eléctrico cuyo sistema de tracción satisface plenamente las exigencias de un relieve particular como el colombiano.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. DURÁNA, B. J. AGUILERAA, Modelado del Sistema de Tracción para un Vehículo Eléctrico. Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático. Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2010.
- [2] Air Research Board – ARB. 2007. Report of the ARB independent expert panel 2007. California. EE.UU.
- [3] C.K. MADSEN, F.O. THORDARSON, J. RASMUSSEN, Parameters for Assessment of EVs impact on Low Voltage Grid, Green eMotion FP7 EU project, D4.3 – B1, 25/11/2013 [disponible: <http://www.greenemotion-project.eu/dissemination/deliverables-infrastructure-solutions.php>]
- [4] Mapa Tecnológico de Movilidad Eléctrica, Observatorio tecnológico de la energía, IDAE, 22/01/2012 [disponible: [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_Movilidad\\_Electrica\\_ACC\\_c603f868.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Movilidad_Electrica_ACC_c603f868.pdf)]
- [5] 2013 California Green Buildings Standard Code, California Code of Regulations, Title 24, part 11, California Building Standards Commission, 07/2013 [disponible: <https://law.resource.org/pub/us/code/bsc.ca.gov/gov.ca.bsc.2013.11.pdf>]
- [6] GONZÁLEZ, ÁLVARO BARANDA. Conversión de un vehículo tradicional dotado de motor de combustión a eléctrico puro. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) Ingeniero (Mecánico). Madrid, 2012.
- [7] IEC 61851-1 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements, IEC international standard, Edition 2.0., 11/2010
- [8] IEC members, [en línea: <http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:5:0>, acceso 14/01/2014]
- [9] Alternative energy for passenger vehicles, University of Minnesota, pp. 20 (1 on PDF)

- [10] SMITH SONIAN. Taking Charge: The Electric Automobile in America. 17 de marzo de 2003.
- [11] BETTINA KAMPMAN, etc (enero de 2010) History of Electric Vehicles, About.com,
- [12] BEAUME, R y MIDLER, CH. (2009): «From technology competition to reinventing individual ecomobility: new design strategies for electric». International Journal of Automotive Technology and Management 9 (2) 174-190
- [13] EMILIO LARRODÉ PELLICER, Automobiles Eléctricos, 5° edición.
- [14] HOLON ACADEMIC INSTITUTE OF TECHNOLOGY, “Overview of power electronic drives for electric vehicles”, HAIT Journal of Science and Engineering B, Volume2, 2005[15] UL-Underwriters Laboratories, “Vehículos eléctricos certificados: ISO 6469 -3,” 2013.
- [16] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA AND BANCO INTERNACIONAL DE RECONSTRUCCIÓN Y FOMENTO, “Desarrollo de una Estrategia para una Política de Vehículos Limpios en Colombia.” Jun-2010.
- [17] USAENE-TECNALIA, “Diseño del marco regulatorio para el desarrollo de los vehículos eléctricos en Colombia.” Feb-2013.
- [18] VARGAS, JUAN. A. (2013) Conversión a auto eléctrico basada en un accionamiento trifásico: diseño, modelación e implementación. universidad de chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería eléctrica.
- [19] PALAFOX. G.I. (2009) Diseño y construcción de un vehículo eléctrico con variador de velocidad mediante un convertidor CD-CD, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA MÉXICO.
- [20] RAMOS, ALEJANDRO. M. Proyecto de conversión de un automóvil de combustión interna en eléctrico, universidad de las palmas de gran canaria, España.
- [21] FLORES, VERÓNICA. Conversión de un Automóvil Estándar de Combustión Interna a Eléctrico, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, MÉXICO.

- [22] PROEV INC. Electric imp project. [Online]. Available: <http://www.proev.com/index.htm>
- [23] K. Barbour. 1991 geo metro convertible. [Online]. Available: <http://www.ddmotorsystems.com/ElectricVehicles.php>
- [24] M. E. HAZEN. (2007, december) A rising wave in transportation electric vehicle conversion. [Online]. Available: [http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue\\_number=07.12.01&article=evconversion](http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=07.12.01&article=evconversion)
- [25] D. VILLAREAL. (2010, agosto) Un volkswagen beetle del 72 eléctrico, adaptado por un chico. [Online]. Available: <http://www.excelenciasdelmotor.com/noticia/un-volkswagen-beetle-del-72-electrico-adaptado-por-un-chico>
- [26] JAZAR, R. N. “Vehicle Dynamics, Theory and Application”. Melbourne Australia, Springer. USA (2008).
- [27] LANCOSTE. (2010) Partes de un coche eléctrico. [Online]. Available: <http://www.motorspain.com/31-05-2010/uncategorized/partes-de-un-coche-electrico>
- [28] L. GUANGDONG M&C ELECTRIC POWER CO., Electric Vehicle Motor, GUANGDONG M&C ELECTRIC POWER CO., LTD, 3/f Dizhi Building No.739 Dongfeng Rd.E Guangzhou China, 2011.
- [29] MORGAN, DAVID (24 de septiembre de 2015). The Independent, ed. Volkswagen emissions: Meet the the man who accidentally discovered the scandal
- [20] CALLE, G.; ROMERO Diseño de Elementos de Máquinas
- [31] IVANOV, M. N. Elementos de Máquinas, Escuela Superior, Moscú: 1984.
- [32] PLANOS MOTOR ELÉCTRICO [Motor AC HPQ7.5YBE-72.]
- [33] INTERMEC S.A. Acople Flexible Interflex. Disponible en: <https://www.intermec.com.co>
- [34] UTP. Manual de procedimiento de uso en laboratorio de pruebas dinámicas automotrices.